



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

**URČOVÁNÍ ZPŮSOBILOSTI A STABILITY VYBRANÉHO
TECHNICKÉHO PROCESU**

DETERMINATION OF CAPABILITY AND STABILITY OF A CHOSEN TECHNICAL PROCESS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Mariana Šváchová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Josef Bednář, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Studentka: **Bc. Mariana Šváchová**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Kvalita, spolehlivost a bezpečnost
Vedoucí práce: **Ing. Josef Bednář, Ph.D.**
Akademický rok: 2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Určování způsobilosti a stability vybraného technického procesu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Diplomová práce bude popisovat standardní metody určování stability a způsobilosti procesu. Dále se budeme zabývat některými z málo obvyklých regulačních diagramů, jako jsou diagramy CUSUM, EWMA a zónové diagramy. Na závěr budou tyto nástroje aplikovány na konkrétní technický proces.

Cíle diplomové práce:

Popis standardních regulačních diagramů.
Popis základních modelů způsobilosti.
Popis méně obvyklých regulačních diagramů (CUSUM, EWMA a zónové diagramy).
Aplikace nástroje na konkrétní proces.
Vyhodnocení dosažených výsledků a doporučení pro praxi.

Seznam doporučené literatury:

MONTGOMERY, Douglas C. Introduction to statistical quality control. 7th ed. Hoboken, NJ: Wiley, c2013. ISBN 9781118146811.

Statistická regulace procesů (SPC): příručka. 2. vyd. Přeložil Jiří MICHÁLEK. Praha: Česká společnost pro jakost, 2006. ISBN 80-02-01810-9.

TOŠENOVSKÝ, Josef. Statistické metody pro zlepšování jakosti. Ostrava: Montanex, 2000. ISBN 80-7225-040-X.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Táto diplomová práca sa zaoberá hodnotením spôsobilosti konkrétneho výrobného procesu. Teoretická časť práce obsahuje popis štatistickej regulácie procesov, typy regulačných diagramov a hodnotenie spôsobilosti procesu. Praktická časť je zameraná na vyhodnotenie spôsobilosti konkrétneho procesu. Najskôr je popísaný spôsob zberu dátovej sady, následne sú tieto dáta analyzované a je vyhodnotená spôsobilosť tohoto procesu.

KĽÚČOVÉ SLOVÁ

štatistická regulácia procesu, Shewhartove regulačné diagramy, diagram EWMA, diagram CUSUM, spôsobilosť procesu

ABSTRACT

This diploma thesis deals with the evaluation of the capability of a specific production process. The theoretical part of the work contains a description of statistical process control, types of control charts and evaluation of process capability. The practical part is focused on evaluating the capability of a specific process. The method of dataset collection is described at first, then this data are analyzed and the capability of this process is evaluated.

KEYWORDS

statistical process control, Shewhart control charts, EWMA chart, CUSUM chart, process capability

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

ŠVÁCHOVÁ, Mariana. *Určování způsobilosti a stability vybraného technického procesu*. Brno, 2020, 66 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedúci práce: Ing. Josef Bednář, Ph.D.

POĎAKOVANIE

Veľmi by som sa chcela poďakovať svojmu vedúcemu práce pánovi Ing. Josefovi Bednářovi, Ph.D. za odborné vedenie práce, konzultácie, trpezlivosť a cenné pripomienky a rady pri vypracovávaní diplomovej práce.

VYHLÁSENIE

Vyhlasujem, že som svoju diplomovú prácu vypracovala samostatne pod vedením Ing. Josefa Bednáře Ph. D. a s využitím literatúry uvedenej v zozname literatúry.

Brno

.....

podpis autorky

Obsah

1	Úvod	15
2	Štatistická regulácia výrobného procesu	17
2.1	Variabilita procesu	17
2.1.1	Náhodné príčiny	17
2.1.2	Vymedziteľné príčiny	18
2.2	Fázy štatistickej regulácie procesu	18
2.3	Základné pojmy a parametre regulačných diagramov	20
3	Regulačné diagramy	23
3.1	Shewhartove regulačné diagramy	23
3.1.1	Regulačné diagramy pri kontrole meraním	26
3.1.2	Regulačné diagramy pri kontrole porovnávaním	28
3.1.3	Signály štatisticky nezvládnutého procesu	28
3.2	Metoda kumulovaných súčtov CUSUM	30
3.3	Zónové diagramy	31
3.4	Diagramy EWMA	32
3.5	Viacrozmerné diagramy	32
3.6	Hotellingov diagram	34
4	Spôsobilosť procesu	35
4.1	Hodnotenie spôsobilosti procesu	35
4.2	Indexy spôsobilosti	37
4.2.1	Index spôsobilosti C_p	37
4.2.2	Index spôsobilosti C_{pk}	38
4.2.3	Index spôsobilosti C_{pm}	40
4.2.4	Index spôsobilosti C_{pm}^*	41
4.2.5	Index spôsobilosti C_{pmk}	41
5	Praktická časť	45
5.1	Ciele praktického experimentu	45
5.1.1	Predstavenie spoločnosti	45
5.1.2	Špecifikácia merania	45
5.1.3	Spôsob vyhodnotenia	46
5.2	Vyhodnotenie procesu	46
5.2.1	Zber datovej sady	46
5.2.2	Analýza dát	46
5.3	Vyhodnotenie dosiahnutých výsledkov	54

6 Záver	57
Literatúra	59
Zoznam príloh	61
A Konštanty	63
B Namerané dáta	65

1 Úvod

V posledných desaťročiach, a hlavne s príchodom Priemyslu 4.0, sa ako veľmi dôležitou časťou výrobných procesov ukazuje ich dôsledná analýza a následná optimalizácia. Vďaka optimalizácií a zefektívneniu pracovných a procesných postupov je možné minimalizovať poruchové výrobky a tým zvýšiť efektivitu výroby, zvýšiť spokojnosť zákazníkov, zjednodušiť potrebné úkony, ale v konečnom dôsledku aj znížiť dopad ľudskej činnosti na prírodu, či už šetrením prírodných zdrojov, ale aj redukciou množstva odpadu.

Táto diplomová práca sa zaoberá analýzou a vyhodnotením výrobného procesu komponentu v spoločnosti XYZ. Spoločnosť XYZ je nadnárodná spoločnosť, ktorá pôsobí vo viac ako 130 krajinách, má viac ako 100 výrobných závodov a zamestnáva viac ako 75 000 ľudí po celom svete. Zaoberá sa návrhom a výrobou produktov konektivity a senzorov pre rôzne priemyselné odvetvia ako sú automobilový priemysel, letectvo, obrana, priemyselné zariadenia, zdravotníctvo, spotrebná elektronika a energie. Túto tému som si zvolila z dôvodu môjho zamestnania v spoločnosti XYZ a záujmu o hlbšie pochopenie problematiky analýzy a optimalizácie výrobného procesu. Výroba zvoleného komponentu je podstatnou súčasťou v celkovom výrobku, jeho správna funkčnosť je nutná pre prevádzku celkového produktu a zákazník údaje o tomto komponente vyžaduje prísne sledovať v rámci hodnotenia spoľahlivosti výroby. V rámci praktickej časti budú najskôr namerané dáta z reálneho výrobného procesu a následne aplikované postupy pre určenie spôsobilosti procesu a nakoniec budú tieto postupy vyhodnotené.

Nasledujúca kapitola tejto práce je venovaná teoretickému úvodu do štatistického riadenia procesu. Tretia kapitola obsahuje prehľad regulačných diagramov, po ktorých nasleduje štvrtá kapitola, ktorá sa zameriava na hodnotenie spôsobilosti procesu. Praktická časť je náplňou piatej kapitoly, ktorá obsahuje návrh experimentu a jeho následné vyhodnotenie. Poslednou kapitolou je záver, kde sú zhrnuté získané poznatky.

2 Štatistická regulácia výrobného procesu

Obsahom tejto kapitoly je úvod do základných pojmov, na začiatku sú vysvetlené pojmy variability procesu, príčiny vzniku tejto variability. Kapitola ďalej pokračuje popisom fáz štatistickej regulácie procesu.

Kontrola kvality výstupu z procesu [1] patrí medzi tradičné spôsoby, ako zabezpečovať kvalitu. Podstatou je vytriedenie jednotiek, ktoré nesplňujú špecifikácie. Tento spôsob zabezpečovania kvality je neekonomický, pretože sa kontrola vykonáva až po tom, ako bol výrobok vytvorený. Ak výrobok nesplňuje požiadavky, nie je možné ďalšie využitie výrobku (alebo sa musí výrobok prepracovať). Prevencia proti nesplneniu požiadaviek môže byť zaistená neustálym získavaním informácií o správaní produktu, a ich analýzou, vďaka čomu sa dá upraviť proces tak, aby výstupná výroba mala požadované vlastnosti.

Základným nástrojom riadenia kvality je štatistické riadenie procesu [1] (z anglického Statistical Process Control, ďalej v práci používaná skratka SPC). SPC je preventívny spôsob riadenia kvality, dá sa pomocou neho včas odhaliť významné odchýlky procesu od stanovenej úrovne kvality. Umožňuje realizovať zásahy do procesu s cieľom udržiavať tento proces dlhodobo na prípustnej a stabilnej úrovni, alebo proces zlepšovať.

2.1 Variabilita procesu

Variabilita je prirodzenou vlastnosťou každého procesu [1], ktorej dôsledkom môže byť problém s jeho opakovateľnosťou. Na proces neustále pôsobí mnoho vplyvov, z dôvodu ktorých sa nedajú vyrobiť dva úplne totožné produkty. Tieto vplyvy však môžeme študovať, a vytvoriť také podmienky, aby bolo možné predvídať správanie procesu do budúcnosti. Ak sa variabilita zníži, dostaneme rovnomernejší proces s menšou pravdepodobnosťou výskytu nezhodných kusov, ktoré väčšinou končia ako odpad, alebo sa musia opraviť. Taktiež sa znížia náklady na kontrolu a skúšanie a náklady spôsobené poruchou procesu.

SPC člení variabilitu na dva druhy:

- variabilita vyvolaná náhodnými, prirodzenými príčinami,
- variabilita vyvolaná vymedziteľnými, identifikovateľnými príčinami.

2.1.1 Náhodné príčiny

Náhodné príčiny [2] pôsobia na každý výrobný proces a nedajú sa ovplyvniť. Sú jednotlivo neidentifikovateľné, a každá z nich ovplyvňuje variabilitu inou mierou.

Ak variabilitu procesu ovplyvňujú iba náhodné príčiny, dá sa proces charakterizovať ako opakovateľný a v štatisticky stabilnom stave. Typ a parametre rozdelenia zvoleného znaku kvality, podľa ktorého sa hodnotí variabilita procesu, sa nemenia a sú známe. Príkladom náhodných príčin môže byť vlhkosť ovzdušia, teplota ovzdušia alebo chvenie stroju. Obmedziť vplyv náhodných príčin býva väčšinou časovo aj finančne náročné, pretože je potrebné napríklad zmeniť technológiu výroby alebo kúpiť nový stroj.

2.1.2 Vymedziteľné príčiny

Vymedziteľné príčiny [1, 3] bežne na proces nepôsobia. Ich prítomnosť však spôsobí zmeny procesu, ktoré sa prejavujú neprirodzeným kolísaním sledovaného znaku kvality. V takomto stave nie je možné reprodukovать proces a kvalita výstupov procesu je nepredvídateľná. Proces tým pádom nie je štatisticky stabilný. Vymedziteľné príčiny sa delia na sporadické a pretrvávajúce. Sporadické príčiny vznikajú neočakávane a trvajú iba krátku dobu. Následne sa tieto príčiny stratia a v budúcnosti sa môžu opäť vyskytnúť. Pretrvávajúce príčiny vyvolávajú dlhodobejšie odchýlky. Príkladom môže byť nepreškolená obsluha stroja, zmena nastavenia stroja alebo zmena materiálu.

Pokiaľ chceme proces zlepšovať, je potrebné neustále sledovať jeho správanie. Cieľom tohto sledovania je dosiahnuť štatisticky zvládnutý proces. Tento stav dosiahneme zisťovaním a elimináciou vymedziteľných príčin tak, aby proces bol schopný plniť požiadavky na kvalitu.

2.2 Fázy štatistickej regulácie procesu

Hlavným cieľom SPC je upraviť a udržať proces v takom stave, aby bola zhoda výrobku s požiadavkami zákazníka. Stav, kedy je proces štatisticky zvládnutý, sa hovorí spôsobilý proces.

Fázy realizácie hlavného cieľa SPC sú [1]:

- Prípravná fáza
- Fáza zabezpečenia stavu štatistickej zvládnutelnosti procesu
- Fáza analýzy a zabezpečenia spôsobilosti procesu

Prípravná fáza

V prípravnej fáze [1] sa ako prvé identifikujú ciele regulácie. Ďalej sa stanovujú znaky kvality alebo parametre procesu, ktoré budú regulovanou veličinou, ktorej hodnoty je treba sledovať. Voľba tohoto znaku závisí na požiadavkách zákazníka, z FMEA

(Failure Mode and Effects Analysis, analýza možných chýb a ich následkov), z usporiadaného toku výroby, alebo z požiadavkov zadaných v konštrukčnej dokumentácii. Dôležitým rozhodnutím je aj to, či sa na jednom výrobku bude sledovať jeden, alebo viac znakov kvality. Zvolí sa metóda na získavanie hodnôt sledovaného znaku, ktorej vhodnosť sa overuje pomocou analýzy meracieho systému (MSA - Measurement system analysis). Vhodná dĺžka intervalu sledovania sa určí podľa typu technológie, dĺžky výrobného cyklu alebo možnosti prevedenia odberu vzoriek tak, aby bolo možné zachytiť dôležité zmeny v procese. Nakoniec je potrebné zvoliť vhodný typ regulačného diagramu (Graf, ktorý zobrazuje dynamické zmeny vybraných ukazovateľov kvality v čase, v závislosti od systematických vplyvov - bližšie popísané v nasledujúcej kapitole) a pripraviť zber a záznam dat.

Fáza zabezpečenia stavu štatistickej zvládnutosti procesu

Cielom tejto fázy je identifikácia a minimalizácia pôsobenia vymedziteľných príčin a zabránenie ich opätovnému opakovaniu. Realizácia tejto etapy sa robí pomocou zostrojenia regulačného diagramu a jeho následná analýza. Pokiaľ sa v diagrame nachádzajú body nespádajúce do regulačných medzí, je potrebné identifikovať vymedziteľné príčiny a ich pôsobenie eliminovať. Po ich identifikovaní a eliminácii je potrebné vykonať nápravné opatrenia, aby sa ich pôsobenie do budúcnosti neopakovalo. Potom je možné tieto hodnoty, pri ktorých boli identifikované vymedziteľné príčiny, vypustiť a tým pádom sa prepočítajú regulačné medze a centrálna priamka (tieto pojmy budú popísané v nasledujúcej kapitole). Tento postup sa opakuje až kým všetky hodnoty ležia v regulačných medziach a nevykazujú žiadne náhodné zoskupenia.

Fáza analýzy a zabezpečenia spôsobilosti procesu

Vo fáze analýzy a zabezpečenia spôsobilosti procesu [4] sa skúma, či je proces po predchádzajúcej regulácii schopný plniť požiadavky zákazníka (napríklad tolerančné medze). Aby bolo možné posudzovať spôsobilosť procesu, musí byť proces štatisticky zvládnutý. Pokiaľ je proces štatisticky zvládnutý, a aj spôsobilý, je postačujúce aby sa naďalej iba monitorovalo správanie procesu. V prípade, že je proces štatisticky zvládnutý, ale nie je spôsobilý, je nutné znížiť variabilitu procesu vyvolanú náhodnými príčinami. Ak však proces vyhovuje zákazníckym požiadavkom, ale nie je štatisticky zvládnutý, je potrebné identifikovať vymedziteľné príčiny a prijať nápravné opatrenia. Ak proces nevyhovuje požiadavkom zákazníka a ani nie je štatisticky zvládnutý, je nutná redukcia náhodných aj vymedziteľných príčin variability.

2.3 Základné pojmy a parametre regulačných diagramov

Pred konštrukciou samotných diagramov je najskôr potrebné popísať proces pomocou ukazovateľov polohy procesu a variability procesu [5]. Medzi ukazovatele polohy patrí aritmetický a kľzavý priemer a medián, ktoré určujú, kde sa sledovaný proces nachádza. K ukazovateľom variability patrí rozpätie, kľzavé rozpätie a smerodajná odchýlka.

Aritmetický priemer

Keďže pracujeme s výberovým súborom, pre výpočet aritmetického priemeru (označenie \bar{x}) použijeme vzorec:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (2.1)$$

kde x_i sú jednotlivé hodnoty, n je celkový počet hodnôt výberu. Aritmetický priemer je citlivý na extrémny, pretože počíta zo všetkými hodnotami, obzvlášť ak je malý počet vzoriek. Keď nie je možný odber väčšieho množstva vzoriek, doporučuje sa použiť kľzavý priemer.

Medián

Medián predstavuje hodnotu, ktorá sa nachádza presne v strede súboru nameraných hodnôt. Jeho výhodou je, že nie je citlivý na extrémny, tak ako je to v prípade priemeru. Výpočet mediánu sa líši podľa toho, či je súbor hodnôt n párny alebo nepárny. Výpočet mediánu pre nepárny počet vzoriek n je:

$$\tilde{x} = x_{(\frac{n+1}{2})} \quad (2.2)$$

Ak je počet hodnôt n párny, použije sa vzorec:

$$\tilde{x} = \frac{x_{(\frac{n}{2})} + x_{(\frac{n}{2}+1)}}{2} \quad (2.3)$$

Rozpätie

Rozpätie hodnôt určuje rozdiel medzi maximálnou hodnotou a minimálnou hodnotou v súbore dát. Vypočíta sa zo vzorca:

$$R = x_{max} - x_{min} \quad (2.4)$$

Kĺzavé rozpätie

V prípadoch, kedy nie je možné odobrať dostatočný počet vzorkov sa používa kĺzavé rozpätie, ktoré používa hodnoty z predchádzajúcich meraní. Vzorec pre výpočet vyzerá nasledujúco:

$$MR_i = |x_i - x_{i+1}| \quad (2.5)$$

Smerodajná odchýlka

Smerodajná odchýlka určuje mieru variability procesu. Smerodajná odchýlka ukazuje, ako moc sa od seba líšia jednotlivé hodnoty v súbore skúmaných hodnôt. Ak je jej hodnota malá, hodnoty sa od seba moc nelíšia a sú si väčšinou podobné. Ak je hodnota smerodajnej odchýlky väčšia, budú aj rozdiely medzi hodnotami väčšie. Pre výberové súbory sa používa výberová smerodajná odchýlka, ktorá je definovaná vzťahom:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (2.6)$$

Podskupiny

Norma ČSN ISO 8258 definuje výber ako logickú podskupinu, ktorou sa rozumie taká skupina jednotiek, v rámci ktorých je možné predpokladať pôsobenie iba náhodných príčin.

Pre rozsah podskupiny ČSN ISO 8258 síce doporučuje $n = 4$ alebo 5 , ale tabuľky súčiniteľov pre výpočet regulačných medzí uvádzajú pre $n = 2$ až 25 . V norme je taktiež zdôraznená zásada, že pri zavádzaní štatistickej regulácie je nutné dodržať rovnaký rozsah logickej podskupiny pri:

- analýze výrobného procesu (všetky podskupiny musia mať rovnaký rozsah n),
- odhade variability výrobného procesu (či už pomocou s alebo R),
- výpočte ukazovateľa spôsobilosti výrobného procesu,
- vlastnej realizácií štatistickej regulácie.

3 Regulačné diagramy

Hlavným cieľom regulácie procesu [6] je predikcia súčasného stavu a budúceho stavu výrobného procesu. K tomu môžu vo významnej miere dopomôcť regulačné diagramy, ktoré sú hlavným nástrojom regulácie procesu.

Regulačné diagramy sú základne nástroje pre reguláciu a zlepšovanie procesu. Pri konštrukcii týchto diagramov sa postupuje podľa nasledujúceho postupu:

1. Zber dát - zozbieranie a zakreslenie dát do diagramu.
2. Regulácia - výpočet regulačných medzí z dát, identifikácia príčin kolísania a opatrenie k odstráneniu týchto kolísaní.
3. Analýza a zlepšovanie - kvantifikácia náhodných príčin a opatrenie k zníženiu kolísaní.

Jedným z možných rozdelení regulačných diagramov je rozdelenie podľa počtu sledovaných znakov:

- pre sledovanie jedného znaku kvality:
 - Shewhartove diagramy,
 - diagramy kumulovaných súčtov CUSUM,
 - diagram exponenciálne vážených klzavých priemerov EWMA,
 - zónový diagram,
 - diagram pre malosériovú výrobu Short Run,
 - trendový diagram.
- pre sledovanie viacerých znakov kvality:
 - Hotellingov diagram,
 - viacrozmerný diagram kumulovaných súčtov MCUSUM,
 - viacrozmerný diagram exponenciálne vážených klzavých priemerov MEWMA.

Ďalej budú v tejto kapitole popísané vybrané regulačné diagramy.

3.1 Shewhartove regulačné diagramy

Pri štatistickej regulácii sa vyskytujú 2 základné chyby. Prvou je chyba 1. druhu - chybou je započítanie kolísania k vymedziteľnej príčine, aj keď patrí medzi náhodné príčiny. Dôsledkom tejto chyby môže dochádzať k nadbytočnému nastavovaniu výrobného stroja. Druhou je chyba 2. druhu - chybou je započítanie kolísania systému, ktorý je ovplyvňovaný náhodnými príčinami, ale v skutočnosti patrí medzi vymedziteľné príčiny. Táto chyba nastáva vtedy, keď sa nevykonáva žiaden úkon na zistenie vymedziteľných príčin. Aby sa dalo účinne zvládnuť kolísanie hodnôt v priebehu výroby, je potrebné mať účinné prostriedky k detekcii zvláštnych príčin. Práve preto

boli Walterom Shewhartom [1, 3] vyvinuté regulačné diagramy, ktoré sú jednoduchým a účinným nástrojom pre detekciu kolísania. Odlišuje sa v nich regulované kolísanie (kolísanie spôsobené iba náhodnými príčinami) od neregulovaného kolísania (spôsobené vymedziteľnými príčinami). Tieto diagramy sa používajú k regulácii rôznych procesov a k ich zlepšovaniu. Sú priamo orientované na vymedziteľné príčiny kolísania a efektívne odrážajú kolísanie spôsobené náhodnými príčinami. Ak sa v procese nenachádzajú žiadne vymedziteľné príčiny, proces považujeme že je v štatisticky zvládnutom stave. Proces sa potom správa ako stabilný, je možné predpovedať jeho ďalšie správanie a spôsobilosť. V prípade prítomnosti vymedziteľnej príčiny sa proces bude správať ako štatisticky nezvládnutý, jeho spôsobilosť bude nestabilná, takže ju nie je možné predpovedať.

Výpočetné vzťahy pre regulačné diagramy

Pre stanovenie regulačných diagramov je ako prvé potrebné zhromaždiť údaje o sledovanom znaku kvality [7, 8]. Aby bolo možné urobiť analýzu, je potreba získať údaje minimálne o 25 podskupinách, ktorých rozsah je 4 alebo 5 jednotiek.

Výpočet výberových charakteristík je uvedený vo vzorcoch 2.1 a 2.4. Okrem týchto hodnôt je potrebné stanoviť centrálnu priamku (CL), hornú regulačnú medzu (UCL) a dolnú regulačnú medzu (LCL). Pre Shewhartove diagramy platí, že regulačné medze sú od centrálnej priamky vo vzdialenosti troch smerodajných odchýlok danej výberovej charakteristiky. Ak nie sú dostupné skôršie informácie o základných hodnotách, pre výpočet sa použije odhad smerodajnej odchýlky na základe priemerného výberového rozpätia v podskupinách. Ako príklad sú uvedené vzorce pre diagram \bar{x} , R . Pre centrálnu priamku diagramu \bar{x} platí vzorec:

$$CL_{\bar{x}} = \bar{\bar{x}} = \frac{\sum_{j=1}^k \bar{x}_j}{k} \quad (3.1)$$

Pre hornú regulačnú medzu diagramu \bar{x} platí vzorec:

$$UCL_{\bar{x}} = \bar{\bar{x}} + A_2 \cdot \bar{R} \quad (3.2)$$

Pre dolnú regulačnú medzu diagramu \bar{x} platí vzorec:

$$LCL_{\bar{x}} = \bar{\bar{x}} - A_2 \cdot \bar{R} \quad (3.3)$$

kde:

- \bar{x} je priemerná hodnota priemerov v podskupinách,
- \bar{R} je priemerná hodnota rozpätia v podskupinách,
- A_2 je koeficient, ktorého hodnota závisí na rozsahu podskupín (viď. príloha A),
- k je počet podskupín.

Pre diagram R platia nasledujúce vzťahy:

$$CL_R = \bar{R} \quad (3.4)$$

$$UCL_R = D_4 \cdot \bar{R} \quad (3.5)$$

$$LCL_R = D_3 \cdot \bar{R} \quad (3.6)$$

kde D_3, D_4 sú koeficienty, ktorých hodnota závisí od rozsahu podskupín.

Následne sa získané hodnoty CL, UCL a LCL vynesú do grafov podľa príslušných charakteristík. V prvom diagrame sa budú sledovať zmeny v hodnotách strednej polohy (diagram \bar{x}) a v druhom zmena variability hodnôt v podskupinách (diagram R). Po vynesení hodnôt do grafov sa sledujú hodnoty výberových charakteristík neukazujú na prítomnosť vymedziteľnej príčiny. Na toto sa používajú testy vymedziteľných príčin 3.1.3.

Vzorce pre výpočet CL, UCL a LCL pre ostatné diagramy sa nachádza v tabuľke na obrázku 3.1.

Základné hodnoty	Základné štatistiky	RD meraním				Základné štatistiky	RD porovnávaním			
		LCL	CL	UCL			LCL	CL	UCL	
nie sú stanovené	priemer	$\bar{\bar{x}} - A_2 \bar{R}$ $\bar{\bar{x}} - A_3 \bar{s}$	$\bar{\bar{x}}$	$\bar{\bar{x}} + A_2 \bar{R}$ $\bar{\bar{x}} + A_3 \bar{s}$	podiel nezhodných jednotiek	p	priemerná $\bar{p} - 3\sqrt{\bar{p}(1-\bar{p})/n}$ individuálna $\bar{p} - 3\sqrt{\bar{p}(1-\bar{p})/n_j}$	\bar{p}	priemerná $\bar{p} + 3\sqrt{\bar{p}(1-\bar{p})/n}$ individuálna $\bar{p} + 3\sqrt{\bar{p}(1-\bar{p})/n_j}$	
	rozptätie	R	$D_3 \bar{R}$	\bar{R}	$D_4 \bar{R}$					
	štandardná odchýlka	s	$B_3 \bar{s}$	\bar{s}	$B_4 \bar{s}$	počet nezhodných jednotiek	np	$n\bar{p} - 3\sqrt{n\bar{p}(1-\bar{p})}$	$n\bar{p}$	$n\bar{p} + 3\sqrt{n\bar{p}(1-\bar{p})}$
	individuálne hodnoty	X	$\bar{x} - \frac{3}{d_2} \bar{R}$	\bar{x}	$\bar{x} + \frac{3}{d_2} \bar{R}$	počet nezhôd	c	$\bar{c} - 3\sqrt{\bar{c}}$	\bar{c}	$\bar{c} + 3\sqrt{\bar{c}}$
	kľzavé rozptätie	R_k	$D_3 \bar{R}_k$	\bar{R}_k	$D_4 \bar{R}_k$	počet nezhôd na jednotku	u	priemerná $\bar{u} - 3\sqrt{\frac{\bar{u}}{n}}$ individuálna $\left(\bar{u} - 3\sqrt{\frac{\bar{u}}{n_j}}\right)$	\bar{u}	priemerná $\bar{u} + 3\sqrt{\frac{\bar{u}}{n}}$ individuálna $\left(\bar{u} + 3\sqrt{\frac{\bar{u}}{n_j}}\right)$
	medián	\tilde{x}	$\tilde{x} - A_4 \bar{R}$	\tilde{x}	$\tilde{x} + A_4 \bar{R}$					
	priemer	\bar{x}	$x_0 - A\sigma_0$	x_0	$x_0 + A\sigma_0$	podiel nezhodných jednotiek	p_0	$p_0 - 3\sqrt{p_0(1-p_0)/n}$	p_0	$p_0 + 3\sqrt{p_0(1-p_0)/n}$
sú stanovené	rozptätie	R	$D_1 \sigma_0$	$R_0(d_2 \sigma_0)$	$D_2 \sigma_0$	počet nezhodných jednotiek	np_0	$np_0 - 3\sqrt{np_0(1-p_0)}$	np_0	$np_0 + 3\sqrt{np_0(1-p_0)}$
	štandardná odchýlka	s	$B_5 \sigma_0$	$s_0(c_4 \sigma_0)$	$B_6 \sigma_0$	počet nezhôd	c_0	$c_0 - 3\sqrt{c_0}$	c_0	$c_0 + 3\sqrt{c_0}$
	individuálne hodnoty	X	$x_0 - \frac{3}{d_2} R_0$	x_0	$x_0 + \frac{3}{d_2} R_0$	počet nezhôd na jednotku	u_0	$c_0 - 3\sqrt{u_0/n}$	u_0	$u_0 + 3\sqrt{u_0/n}$
	kľzavé rozptätie	R_k	$\frac{D_1}{d_2} s_0$	R_0	$\frac{D_2}{d_2} s_0$	A..., B..., C, D..., d2 - tabelované prepočítavacie koeficienty závislé na rozsahu podskupiny n				

Obr. 3.1: Vzorce pre výpočet parametrov Shewhartových regulačných diagramov. Obrázok bol prevzatý z [9].

Konštrukcia a členenie regulačného diagramu

Základná konštrukcia regulačného diagramu [9] spočíva vo vyobrazení troch základných kritérií: centrálnej priamky (CL), hornej regulačnej medzi (UCL) a dolnej regulačnej medzi (LCL). Okrem toho sa do diagramu vynesú hodnoty vybraného znaku

kvality, poprípade jeho výberové charakteristiky jednotlivých podskupín. Regulačné medze UCL a LCL vymedzujú šírku intervalu, ktorá je daná trojnásobnou hodnotou smerodajnej odchýlky príslušnej štatistickej charakteristiky ($\pm 3\sigma$). Ďalej sa do regulačného diagramu doporučuje zakresliť jednotlivé pásma A, B a C. Pásma C, nazývané aj vnútorné pásma, vyznačuje oblasť medzi centrálnou priamkou a hodnotou smerodajnej odchýlky $\pm\sigma$. Pásma B, ktoré sa nazývajú varovné pásma, leží v rozmedzí $\pm\sigma$ až $\pm 2\sigma$. Pásma A vyznačuje oblasť $\pm 2\sigma$ až $\pm 3\sigma$. Toto pásma sa nazývajú akčné pásma a lemujú ho z vonkajších strán regulačné medze UCL a LCL, ktoré sa tiež môžu nazývať ako akčné medze, keďže v prípade výskytu hodnoty nad týmito medzami je potrebné okamžite zasiahnuť do procesu. Pásma nad hodnotu $\pm 3\sigma$ sa nazývajú ako vonkajšie pásma. Zobrazenie všetkých pásiem je na obrázku 3.2.

3σ	vonkajšie pásma		UCL
	A	akčné pásma	
2σ	B	varovné pásma	
1σ	C	vnútorné pásma	CL
\bar{x}	C	vnútorné pásma	
-1σ	B	varovné pásma	
-2σ	A	akčné pásma	LCL
-3σ	vonkajšie pásma		

Obr. 3.2: Členenie regulačného diagramu na pásma. Obrázok bol prevzatý z [9].

Voľba diagramu

Shewhartove regulačné diagramy sa delia na dve skupiny:

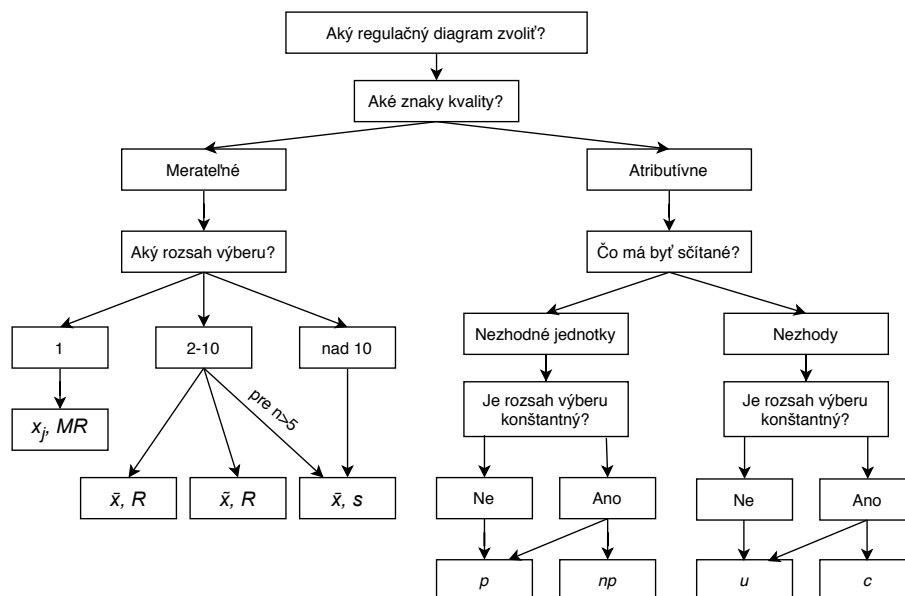
1. Regulačné diagramy pre reguláciu meraní
2. Regulačné diagramy pre reguláciu porovnávaním

Rozhodovací strom na obrázku 3.3 zobrazuje možnosť voľby vhodného regulačného diagramu.

3.1.1 Regulačné diagramy pri kontrole meraní

Medzi regulačné diagramy pre reguláciu meraní patria:

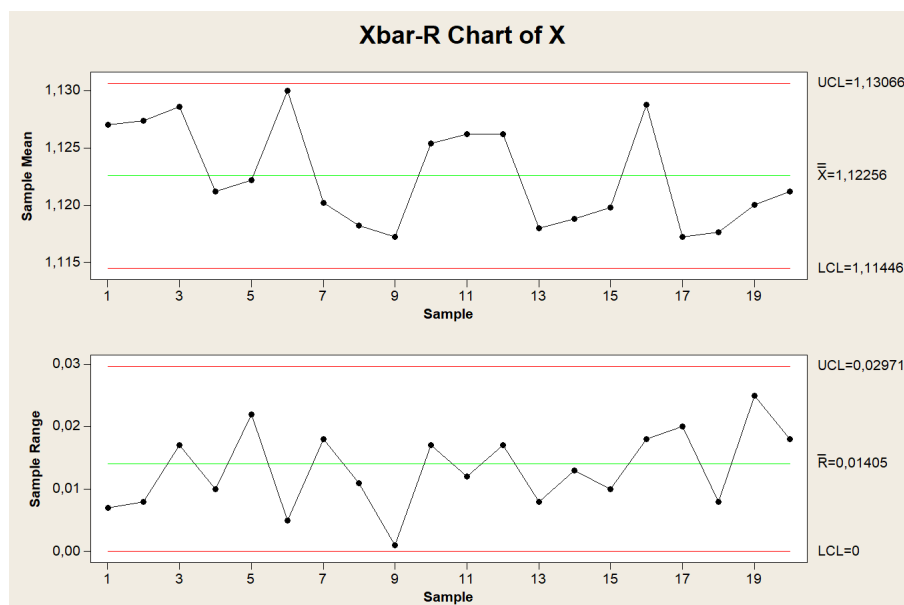
- regulačný diagram pre priemer a rozpätie (\bar{x}, R)
- regulačný diagram pre priemer a smerodajnú odchýlku (\bar{x}, s)
- regulačný diagram pre medián a rozpätie (\tilde{x}, R)



Obr. 3.3: Rozhodovací strom pre voľbu Shewhartovho regulačného diagramu [4]

- regulačný diagram pre individuálne hodnoty priemeru a kľavého rozpätia (x_i, R_i)

Pri štatistickej regulácii meraním sa predpokladá, že hodnoty regulovaného znaku kvality majú normálne rozdelenie. Príklad diagramu pre priemer a rozpätie (\bar{x}, R) je na obrázku 3.4.



Obr. 3.4: Diagram pre priemer a rozpätie (\bar{x}, R)

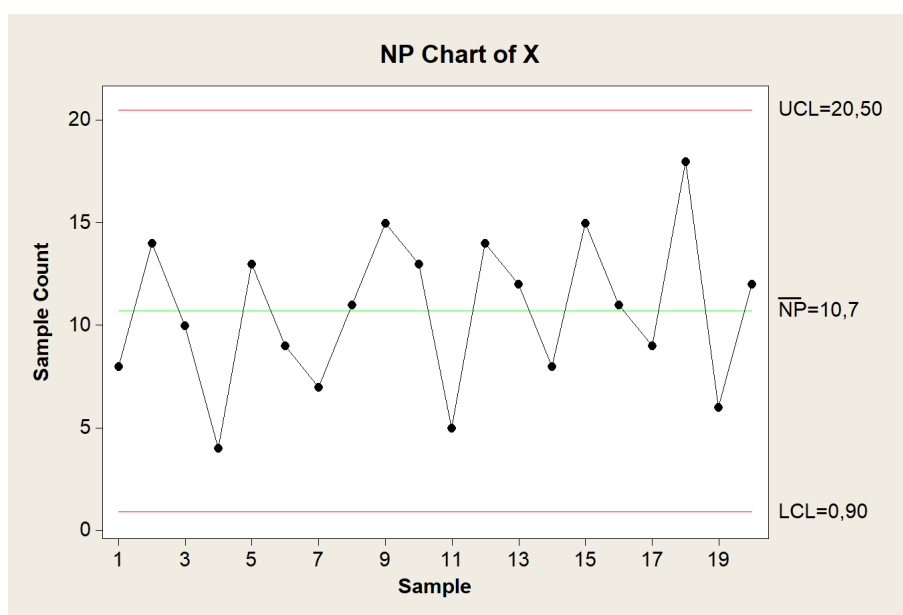
3.1.2 Regulačné diagramy pri kontrole porovnávaním

Medzi regulačné diagramy pre reguláciu porovnávaním patria:

- regulačný diagram pre počet nezhôd (c)
- regulačný diagram pre počet nezhôd na jednotku (u)
- regulačný diagram pre počet nezhodných jednotiek (np)
- regulačný diagram pre podiel nezhodných jednotiek (p)

Pri štatistickej regulácii porovnávaním sa predpokladá, že diagramy pre počet nezhôd (c) a pre počet nezhôd na jednotku (u) majú Poissonovo rozdelenie, a počet nezhodných jednotiek (np) a podiel nezhodných jednotiek (p) majú binomické rozdelenie.

Príklad diagramu pre počet nezhodných jednotiek (np) je na obrázku 3.5

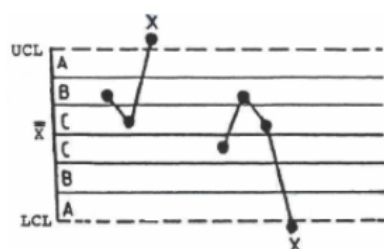


Obr. 3.5: Diagram pre počet nezhodných jednotiek (np)

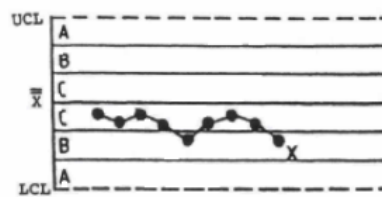
3.1.3 Signály štatisticky nezvládnutého procesu

Testy vymedziteľných príčin

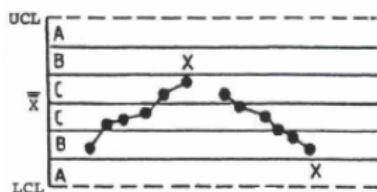
Pre správne zhodnotenie výrobného procesu pomocou regulačných diagramov je potrebné použiť tzv. testy vymedziteľných príčin. Je to usporiadanie zoskupení bodov, ktoré indikujú, že sa v procese deje nežiadúci stav, a je tam možnosť prítomnosti vymedziteľných príčin. Môže to byť stav, kedy sa hodnota sledovaného znaku nachádza mimo regulačné medze, alebo rôzne nezvyčajné zoskupenia hodnôt, ktoré indikujú prítomnosť vymedziteľnej príčiny. Zobrazenie týchto testov vymedziteľných príčin sa nachádza na obrázku 3.6.



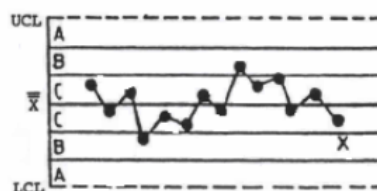
Test 1: Jeden bod leží za zónou A



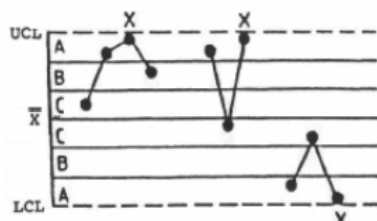
Test 2: Devět bodů v řadě za sebou leží v zóně C nebo za ní



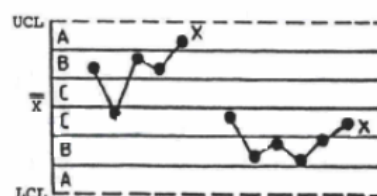
Test 3: Šest bodů v řadě za sebou je plynně stoupajících nebo klesajících



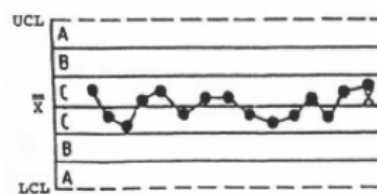
Test 4: Čtrnáct bodů v řadě za sebou pravidelně kolísá nahoru a dolů



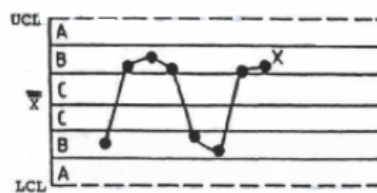
Test 5: Dva ze tří bodů v řadě za sebou leží v zóně A nebo mimo ni



Test 6: Čtyři z pěti bodů za sebou leží v zóně B nebo na ní



Test 7: Patnáct bodů v řadě za sebou leží v zóně C (nad a pod centrální přímkou)



Test 8: Osm bodů v řadě za sebou leží na obou stranách od centrální přímkou, avšak žádný bod neleží v zóně C

Obr. 3.6: Testy vymezitelných příčin. Obrázok prevzatý z ČSN ISO 8258:1994.

Bod mimo regulační medze

Test číslo 1 označuje případ, kedy jedna hodnota leží mimo regulačné medze [10]. Tento stav môže byť spôsobený lokálnou poruchou procesu alebo chybným meraním. Taktiež môžu byť chybné určené regulačné medze. Ak sa hodnota mimo regulačnú medzu opakuje na rovnakej strane, môže sa jednať o posunutie strednej hodnoty alebo o asymetrické rozdelenie dát. Pokiaľ sa hodnoty mimo regulačné medze vyskytujú na oboch stranách, môže to byť spôsobené zvýšenou nestabilitou alebo rozptýlením dát.

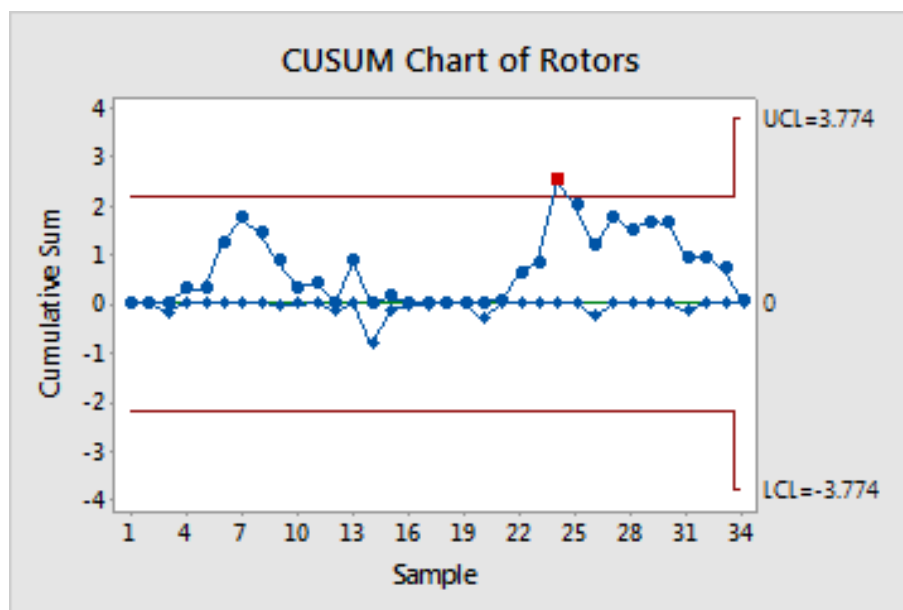
Nenáhodné zoskupenie bodov

Testy číslo 2 až 8 sa zaoberajú nenáhodným zoskupením bodov [10]. Test číslo 2 označuje prípad, kedy 9 hodnôt leží na rovnakej strane od centrálnej priamky. Tento stav je pravdepodobne spôsobený posunutím strednej hodnoty, malou variabilitou medzi podskupinami alebo príliš širokými regulačnými medzami. Test číslo 3 popisuje stav, kedy 6 po sebe nasledujúcich hodnôt klesá, alebo naopak stúpa. Takýto stav väčšinou signalizuje opotrebenie, alebo príliš široké regulačné medze. Test číslo 4 ukazuje na to, kedy 14 hodnôt nasledujúcich za sebou pravidelne s každou ďalšou hodnotou kolíše hore a dole. V tomto prípade sa môže jednať o nestabilný alebo pre-regulovaný proces. Test číslo 5 hovorí o tom, že 2 z 3 hodnôt ležia mimo intervalu $\pm 2\sigma$. Tento stav je varovaním pred možným prekročením regulačných medzí. Test číslo 6 označuje stav, kedy 4 z 5 hodnôt leží mimo interval $\pm \sigma$ na rovnakej strane od centrálnej priamky. Tento stav je taktiež varovaním pred možným prekročením medzi, ale môže byť spôsobený aj posunutím strednej hodnoty. Test číslo 7 popisuje stav, kedy 15 hodnôt leží v okolí centrálnej priamky v intervale $\pm \sigma$. V prípade, že meranie vykonáva operátor, môže tento stav signalizovať fakt, že si uvedené hodnoty vymyslel. Inak ale signalizuje stav, kedy sú nesprávne navolené regulačné medze a je znížená variabilita medzi podskupinami. Posledný test číslo 8 označuje prípad, kedy 8 hodnôt leží na oboch stranách od centrálnej priamky mimo intervalu $\pm \sigma$. Tento stav môže signalizovať zvýšenie variability medzi podskupinami alebo poruchu procesu.

3.2 Metoda kumulovaných súčtov CUSUM

Na proces pôsobia vymedziteľné príčiny, ktoré sa delia na sporadické a pretrvávajúce a ich popis je v kapitole 2.1.2. Sporadické príčiny sa vyskytnú v procese náhle, pôsobia iba krátko a potom zaniknú, ale môžu sa aj opakovať. Tieto príčiny spoľahlivo zachytia Shewhartové diagramy, pretože vyvolajú väčšie odchýlky. Ak ale na proces pôsobia pretrvávajúce príčiny, ich dopad môže byť malý, a tým pádom ich Shewgartove diagramy rýchlo nezachytia. Problémom je to, že Shewhartove diagramy používajú jednotlivé výbery, ale je potrebné používať metódu, ktorá obsahuje informácie o všetkých po sebe nasledujúcich výberoch a lepšie zobrazuje zmeny procesu. Taktiež nie sú Shewhartove diagramy schopné zachytiť presný okamih vzniku odchýlky procesu. Preto bola vytvorená metóda kumulovaných súčtov CUSUM (cumulative Sum Control Charts) [1]. Diagramy CUSUM sú citlivejšie na malé zmeny v procese o veľkosti $0,5\sigma - 2\sigma$, takže sú schopné ich indikovať minimálne dva krát rýchlejšie. Umožňujú presnejšie určiť okamžik vzniku a veľkosť zmeny parametrov regulovanej veličiny.

Príklad diagramu CUSUM je na obrázku 3.7.



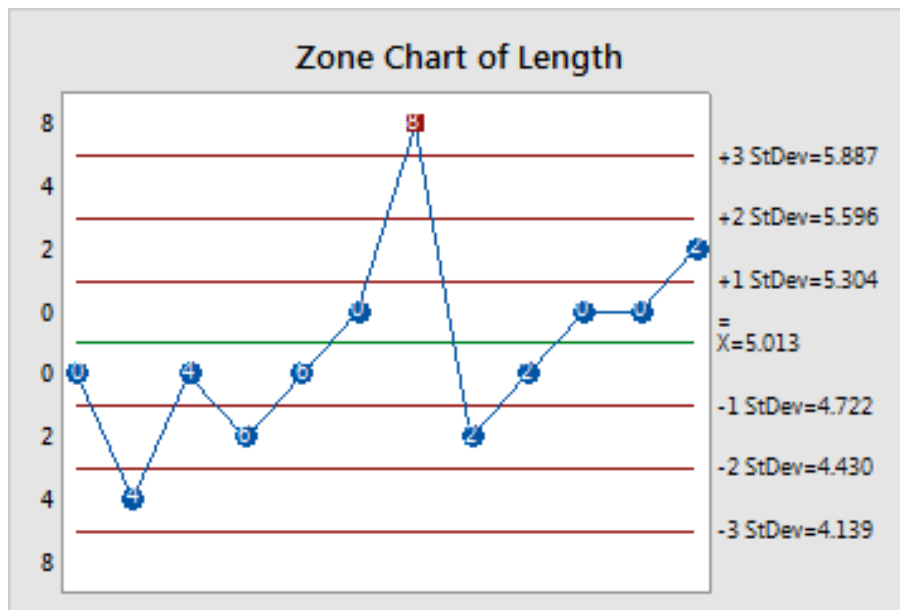
Obr. 3.7: Diagram CUSUM [11]

3.3 Zónové diagramy

Zónový regulačný diagram [12] predstavuje kombináciu regulačného diagramu pre výberové rozpätie s diagramom CUSUM. Zónové diagramy sú typicky preferované oproti diagramu pre výberové rozpätie z dôvodu jednoduchosti. Tento graf má podobne ako Shewhartov diagram centrálnu priamku a vo vzdialenosti $\pm 3\sigma$ má regulačné medze. Ak sa nachádza nejaký bod mimo týchto medzí, diagram signalizuje tento stav. Diagram narozdiel od Shewhartových diagramov pracuje aj so zónou D, ktorá sa nachádza nad regulačnými medzami. Ďalej je diagram schopný signalizovať:

- Dva z troch po sebe idúcich bodov, ktoré nespádajú do vzdialenosti 2σ na rovnakej strane od centrálnej priamky.
- Štyri po sebe nasledujúce body, ktoré nespádajú do vzdialenosti 1σ na rovnakej strane od centrálnej priamky.
- Osem po sebe nasledujúcich bodov na rovnakej strane od centrálnej priamky.

Príklad zónového diagramu je na obrázku 3.8



Obr. 3.8: Zónový diagram [13]

3.4 Diagramy EWMA

Diagramy EWMA (Exponentially Weighted Moving Average-exponenciálne vážený kľzavý priemer) [1, 4, 16] rozširujú možnosť použitia Shewhartových diagramov. Je ich možné použiť na štatistickú reguláciu aj v takých prípadoch, kde sa Shawhartové diagramy použiť nedajú, čo sú napríklad premenné časové rady, kolísavé dáta alebo dáta s trendom. V ostatných diagramoch sa uvažuje iba individuálne vybraná vzorka podskupín, pri diagramoch EWMA sa počíta s exponenciálne váženým kľzavým priemerom všetkých predchádzajúcich vzoriek, čo znamená že vzorky, ktoré sú "najstaršie" prispievajú svojou hodnotou iba málo, a najnovšie vzorky ovplyvňujú výsledné hodnoty najviac. Diagramy EWMA sa používajú najmä pre detekciu menších výkyvov procesu. Diagramy EWMA sa delia na :

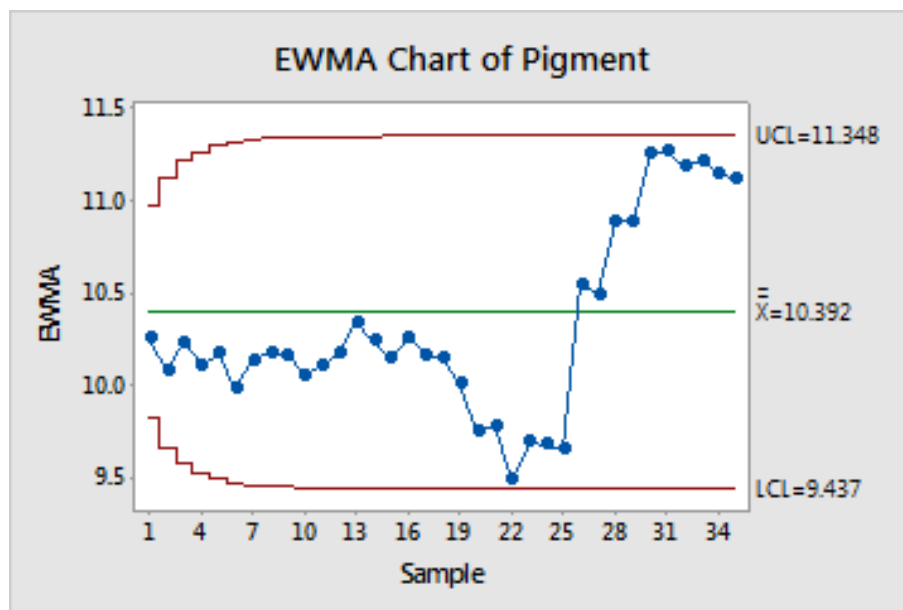
- Diagram EWMA pre výberové priemery (rozsah výberu je väčší než 1)
- Diagram EWMA pre individuálne hodnoty (rozsah výberu n je rovný 1)

Ďalej sa delia na klasický EWMA diagram a dynamický EWMA diagram.

Príklad diagramu EWMA je na obrázku 3.9

3.5 Viacrozmerné diagramy

Pri všetkých regulačných diagramoch, ktoré boli doteraz spomenuté, sa predpokladá, že sa na jednom výrobku sleduje iba jeden znak kvality. V prípade, že potrebujeme sledovať viacero znakov na jednom výrobku sa dá tento problém riešiť Shewhartovým diagramom pre každý znak zvlášť. Toto riešenie sa dá použiť iba v prípade, že sú



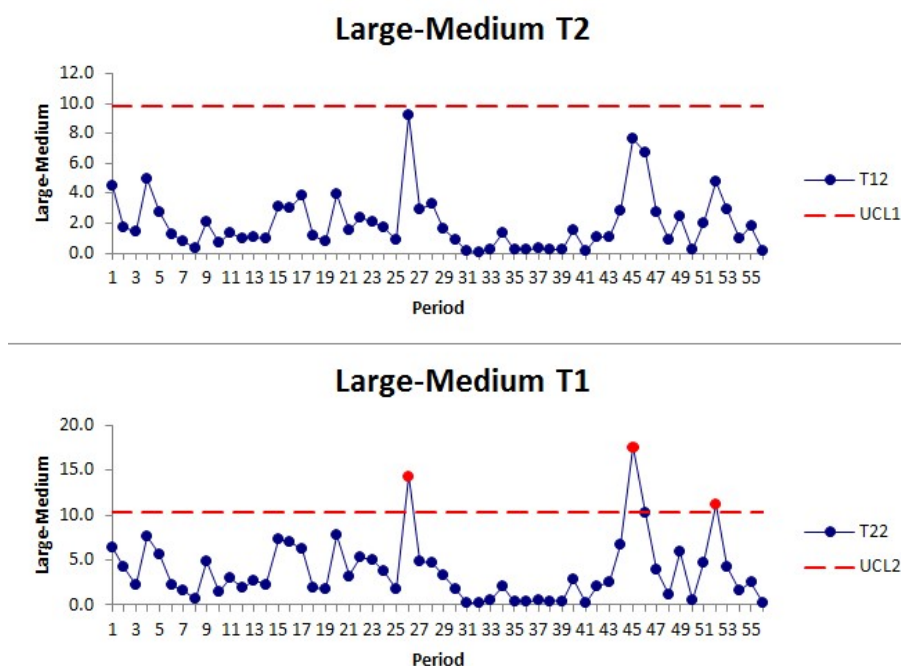
Obr. 3.9: Diagram EWMA [14]

znaky kvality nekorelované. Ak by znaky boli vysoko korelované, toto riešenie by viedlo k nesprávnemu vyhodnoteniu štatistickej zvládnutosti procesu. Preto sa pre korelované dáta vynašiel Hottelingov diagram. V tomto prípade sa dá pracovať pre niekoľko znakov naraz v jednom diagrame. Pre viacrozmerné pozorovanie [1, 4] môžeme používať aj diagram pre monitorovanie variability, viacrozmerný diagram CUSUM a EWMA.

3.6 Hotellingov diagram

Hotellingov diagram patrí medzi viacrozmerné regulačné diagramy. Je založený na princípe Shewhartových diagramov, ale používa sa pre monitorovanie viacerých premenných. Jeho výstupom je zistenie, či sa mení poloha vektoru stredných hodnôt kvôli prítomnosti vymedziteľnej príčiny. Prítomnosť vymedziteľnej príčiny môže okrem neobvyklých hodnôt jednotlivých znakov signalizovať aj nezvyčajná kombinácia týchto znakov, aj keď ich samotná hodnota nezvyčajná nie je.

Príklad Hotellingovho diagramu je na obrázku 3.10



Obr. 3.10: Hotellingov diagram [15]

4 Spôsobilosť procesu

Spôsobilosť výrobného procesu [2, 8] je dôležitou charakteristikou výrobného procesu. Je to schopnosť procesu trvalo dosahovať stanovené kritériá kvality, ktoré sú dopredu určené. Znalosť tejto spôsobilosti má značný vplyv na plánovanie a zlepšovanie kvality. Táto informácia je dôležitá predovšetkým pre výrobcu, ale tiež aj pre zákazníka, ktorému dokazuje, či výrobok vznikol pri dodržiavaní predpísaných výrobných kritérií kvality v stabilných výrobných podmienkach. Cieľom hodnotenia spôsobilosti technologického procesu je schopnosť procesu udržiavať cieľovú hodnotu ukazovateľa kvality, a mieru variability okolo cieľovej hodnoty. Spôsobilosť overuje, či je zvolený proces vhodný pre splnenie požadovaných znakov kvality výrobku, a umožňuje odhadnúť, s akou pravdepodobnosťou sa vyskytne nezhodný výrobok. Je tiež dôležitým podkladom pre aktivity súvisiace so zlepšovaním, pre plánovanie údržby výrobného zariadenia. Hodnotenie spôsobilosti požadovaného znaku kvality by sa malo vykonávať pri nákupe výrobného zariadenia, po jeho opravách, modernizácii alebo napr. pri zmene vyrábaného výrobku. Tieto informácie o spôsobilosti výrobného procesu ako aj informácie o spôsobilosti výrobného zariadenia umožňujú sledovať, ako pôsobia na variabilitu zvoleného znaku kvality vplyvy pochádzajúce od obsluhy, od materiálu, alebo ako na to vplýva oprava a údržba zariadenia.

4.1 Hodnotenie spôsobilosti procesu

Pre zhodnotenie spôsobilosti procesu sa používajú indexy spôsobilosti. Tieto indexy majú za úlohu porovnať maximálnu prípustnú variabilitu, ktorá je daná tolerančnými medzami so skutočnou variabilitou zvoleného znaku kvality. Hlavnou podmienkou ale je, že proces musí byť štatisticky zvládnutý. Pokiaľ sa jedná o merateľný znak kvality, musí jeho rozdelenie spĺňať podmienky normálneho rozdelenia, aby bolo možné tieto indexy použiť. V prípade iného rozdelenia sa použijú indexy iného typu alebo sa použije transformácia dát na normálne rozdelenie.

Postup, podľa ktorého sa dá pristupovať k hodnoteniu spôsobilosti procesu pri merateľných znakoch:

1. voľba znaku kvality
2. analýza systému merania
3. zhromaždenie údajov
4. posúdenie štatistickej zvládnuteľnosti procesu
5. overenie normality sledovaného znaku kvality
6. výpočet indexov spôsobilosti a ich porovnanie s požadovanými hodnotami

1. Voľba znaku kvality

Spôsobilosť procesu sa hodnotí na základe určitého znaku kvality. Ako sledovaný znak sa volí taký znak, ktorý je pre výrobok rozhodujúci. Najčastejšie to býva kritická vlastnosť produktu, alebo môže byť tento znak kritický vzhľadom na nadväzujúci technologický postup, poprípade si ho môže určiť sám zákazník. Pre tento znak musia byť predpísané kritériá kvality, napríklad cieľová hodnota a tolerančné medze. Pokiaľ sa sleduje viacero znakov kvality, je potrebné hodnotiť spôsobilosť pre každý zvlášť.

2. Analýza systému merania

Pred začatím zberu údajov o zvolenom znaku kvality, je potrebné vykonať analýzu systému merania (MSA) a preveriť jeho vhodnosť. Ak by systém merania nebol vyhovujúci, mohol by negatívne ovplyvňovať výsledky hodnotenia spôsobilosti.

3. Zhromaždenie údajov

Časové obdobie zhromažďovania údajov by malo byť tak dlhé, aby bolo zaistené, že sa prejavia všetky bežné zdroje variability procesu. V priebehu tohto obdobia by malo dochádzať k zmenám typickým pre výrobný proces, ako je napríklad bežná údržba, nastavovanie výrobného stroju, zmena obsluhy, zmena vlastností materiálu alebo zmena vlastností prostredia. V určených pravidelných intervaloch je odoberané zvolené množstvo (podskupina) výrobkov vyrobených ihneď po sebe, na ktorých sa následne zisťuje hodnota sledovaného znaku kvality. Podľa ČSN ISO 7870 by sa mali získať údaje minimálne o 25 podskupinách, ktorých rozsah by mal byť 4 až 5 výrobkov.

4. Posúdenie štatistickej zvládnuteľnosti procesu

Pre hodnotenie spôsobilosti procesu je nutné, aby bol tento proces štatisticky zvládnutý a tým pádom bola jeho variabilita vyvolaná iba náhodnými príčinami. Iba v takomto prípade je možné správne vyhodnotiť spôsobilosť procesu, ktorá je použiteľná i pre predikciu stavu procesu.

5. Overenie normality sledovaného znaku kvality

Hodnotenie spôsobilosti procesu sa vykonáva pomocou indexov spôsobilosti, ktoré predpokladajú normálne rozdelenie sledovaného znaku kvality. Preto je potrebné overiť tento predpoklad ešte pred použitím vzorcov pre výpočet indexov spôsobilosti. Ak tento predpoklad nie je splnený, výsledná hodnota môže byť nepoužiteľná.

Rozhodnutie, či sa dá rozdelenie sledovaného znaku aproximovať normálnym rozdelením, sa dá vykonať pomocou tvaru histogramu, ktorý bol zhotovený z nameraných hodnôt. Táto metóda ale nie je plne spoľahlivá. Presnou metódou overenia normality je použitie jedného z testov dobrej zhody, ako napríklad Chí-kvadrát test.

6. Výpočet indexov spôsobilosti a ich porovnanie s požadovanými hodnotami

Ak je proces štatisticky zvládnutý a je overená normalita hodnôt sledovaného znaku kvality, môžeme začať s hodnotením spôsobilosti. Pre tento účel sa používajú indexy spôsobilosti, z ktorých najčastejšie sú indexy C_p a C_{pk} .

4.2 Indexy spôsobilosti

Posúdenie štatistickej zvládnuteľnosti procesu [2, 4] sa vykonáva pomocou rôznych indexov spôsobilosti. Sú to bezrozmerné čísla, ktoré zobrazujú mieru dodržiavania predpísanej úrovne kvality sledovaného znaku procesu.

4.2.1 Index spôsobilosti C_p

Index spôsobilosti C_p [2, 4, 8, 17] je najznámejším a najpoužívanejším ukazovateľom spôsobilosti. Vyjadruje schopnosť procesu zaistiť to, že hodnota sledovaného znaku kvality bude ležať medzi tolerančnými medzami USL a LSL, za predpokladu že sú stanovené obojstranné tolerančné medze. Pri jeho zostavovaní sa predpokladá, že stredná hodnota sledovaného znaku sa nachádza uprostred tolerančných medzí. Princíp, na ktorom funguje konštrukcia indexu C_p , je porovnanie dĺžky tolerančného intervalu ($LSL; USL$) kde by sa mali všetky namerané hodnoty nachádzať, s hodnotou 6σ , ktorá predstavuje interval, kde sa 99,73% nameraných hodnôt reálne nachádza. Index spôsobilosti C_p sa vypočíta zo vzorca:

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma} \quad (4.1)$$

kde:

- LSL je dolná tolerančná medza,
- USL je horná tolerančná medza,
- σ je smerodajná odchýlka.

Podľa výslednej hodnoty indexu C_p je možné získať o procese nasledujúce informácie [8]:

- Ak je $C_p < 1$, proces je z hľadiska sledovaného znaku nespôsobilý, pretože dosahovaná presnosť je menšia než predpísaná presnosť.

- Ak je $C_p = 1$, proces je síce spôsobilý, ale akékoľvek menšie zväčšenie smerodajnej odchýlky ho môže z tohoto stavu vyradiť. Presnosť sa v tomto prípade rovná predpísanej presnosti.
- Ak je $C_p > 1$, proces je spôsobilý a dosahovaná presnosť je väčšia než predpísaná, čo je najviac žiadúci stav.

V minulosti sa index C_p porovnával s hodnotou 1, v súčasnosti sú ale požiadavky na spôsobilosť vyššie, a tak sa tento index porovnáva s hodnotou 1,33, alebo v prípade vyšších nárokov s hodnotou 1,66.

Hodnota smerodajnej odchýlky ale nie je väčšinou k dispozícii, a je potrebné ju nahradiť vhodným odhadom. Keďže s odhadom variability sa pracuje už v regulačných diagramoch pri hodnotení štatistickej zvládnutosti, dajú sa v tomto prípade na odhad smerodajnej odchýlky ($\hat{\sigma}$) použiť vzťahy:

$$\hat{\sigma} = \frac{\bar{R}}{d_2} \quad (4.2)$$

alebo:

$$\hat{\sigma} = \frac{\bar{s}}{C_4} \quad (4.3)$$

alebo:

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^k s_j^2}{k}} \quad (4.4)$$

kde:

\bar{R}	je priemerné variačné rozpätie v podskupinách,
\bar{s}	je priemerná hodnota výberových smerodajných odchýliek v podskupinách,
d_2, C_4	sú konštanty závislé na rozsahu podskupiny,
s_j	je výberová smerodajná odchýlka hodnôt v j-té podskupine,
k	je počet podskupín.

V skutočnosti sa potom odhad indexu spôsobilosti (\hat{C}_p) počíta napríklad podľa vzťahu:

$$\hat{C}_p = \frac{USL - LSL}{6 \cdot \frac{\bar{R}}{d_2}} \quad (4.5)$$

4.2.2 Index spôsobilosti C_{pk}

Index spôsobilosti C_{pk} vo výpočte zohľadňuje variabilitu sledovaného znaku a umiestnenie hodnôt sledovaného znaku kvality v tolerančnom poli. Posudzuje sa vzdialenosť strednej hodnoty voči jednotlivým tolerančným medziam. Charakterizuje skutočnú spôsobilosť procesu dodržiavať predpísané tolerančné medze. Hodnota tohto indexu predstavuje pomer vzdialenosti strednej hodnoty sledovaného znaku kvality od tolerančnej medze k polovici skutočnej variability hodnôt. Index C_{pk} sa dá počítať aj

keď sú špecifikované obojstranné tolerančné medze, a aj keď sú špecifikované iba jednostranné. Na výpočet sa používajú vzťahy:

- Ak je predpísaná dolná tolerančná medza

$$C_{pk} = C_{pL} = \frac{\mu - LSL}{3\sigma} \quad (4.6)$$

- Ak je predpísaná horná tolerančná medza

$$C_{pk} = C_{pU} = \frac{USL - \mu}{3\sigma} \quad (4.7)$$

- Ak je predpísaná dolná aj horná tolerančná medza

$$C_{pk} = \min\{C_{pL}; C_{pU}\} \quad (4.8)$$

Pri indexe spôsobilosti C_{pk} [8] môže nastať situácia, kedy jeho hodnota bude záporná. K tejto situácii dochádza v prípade, kedy stredná hodnota sledovaného znaku kvality presiahne niektorú tolerančnú medzu. To by znamenalo, že z procesu vychádza viac ako 50% nezhodných výrobkov. Rovnaký výsledok sa dá dosiahnuť, aj keď sú nesprávne stanovené tolerančné medze.

Pri výpočte tohoto indexu spôsobilosti je potrebné okrem odhadu smerodajnej odchýlky stanoviť aj odhad strednej hodnoty sledovaného znaku. Pre odhad smerodajnej odchýlky sa používajú vzťahy 4.2, 4.3 alebo 4.4. Pre odhad strednej hodnoty ($\hat{\mu}$) sa používa aritmetický priemer všetkých hodnôt:

$$\hat{\mu} = \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (4.9)$$

Príklad výpočtu odhadu indexu \hat{C}_{pk} môže potom vyzeráť nasledujúco:

$$\hat{C}_{pk} = \min\{\hat{C}_{pL}; \hat{C}_{pU}\} = \min\left\{\frac{\bar{x} - LSL}{3 \cdot \frac{\bar{R}}{d_2}}; \frac{USL - \bar{x}}{3 \cdot \frac{\bar{R}}{d_2}}\right\} \quad (4.10)$$

Aritmetický priemer všetkých hodnôt zodpovedá hodnote priemeru priemerov sledovaného znaku v podskupinách $\bar{\bar{x}}$, ktorý sa používa pri vyhodnocovaní regulačných diagramov. Ak sú stanovené obe tolerančné medze, dá sa vyhodnotiť indexy C_p aj C_{pk} . Potom sa dá medzi ich hodnotami odvodiť vzťah:

$$C_{pk} = C_p - \frac{|\frac{USL+LSL}{2} - \mu|}{3\sigma} = C_p - \frac{|USL + LSL - 2\mu|}{6\sigma} \quad (4.11)$$

Zo vzťahu 4.11 vyplýva, že medzi hodnotami indexov C_p a C_{pk} platí nerovnosť:

$$C_{pk} \leq C_p \quad (4.12)$$

Index spôsobilosti C_{pk} bude tým pádom vždy menší, alebo maximálne rovný hodnote indexu C_p . Rozdiel medzi týmito hodnotami určuje stredná hodnota sledovaného znaku. Čím viac je stredná hodnota sledovaného znaku kvality vzdialená od

stredú tolerančných medzí, tým väčší je rozdiel medzi indexmi C_p a C_{pk} . Aby mali tieto indexy rovnakú hodnotu, musí stredná hodnota sledovaného znaku kvality ležať v strede tolerančného pola. V takomto prípade je spôsobilosť procesu maximálne využitá.

4.2.3 Index spôsobilosti C_{pm}

Index spôsobilosti C_{pm} sa nazýva aj Taguchiho index spôsobilosti [8]. Používa parametre sledovaného znaku ako je stredná hodnota μ a smerodajná odchýlka σ , tolerančné medze USL a LSL , a cieľovú hodnotu T . Tento index porovnáva najvyššiu prípustnú variabilitu sledovaného znaku kvality, ktorá je daná šírkou tolerančného pola, so skutočnou hodnotou variability okolo cieľovej hodnoty T . Index C_{pm} sa môže používať iba v prípade, že sú stanovené obe tolerančné medze a cieľová hodnota leží v strede tolerančného pola. Index C_{pm} je definovaný ako:

$$C_{pm} = \frac{USL - LSL}{6 \cdot \sqrt{\sigma^2 + (\mu - T)^2}} \quad (4.13)$$

kde T je cieľová (optimálna) hodnota.

Odhad indexu spôsobilosti \hat{C}_{pm} sa môže vypočítať napríklad podľa vzťahu:

$$\hat{C}_{pm} = \frac{USL - LSL}{6 \cdot \sqrt{\left(\frac{\bar{R}}{d_2}\right)^2 + (\bar{\bar{x}} - T)^2}} \quad (4.14)$$

Lepšou alternatívou interpretácie indexu C_{pm} je použitie indexu C_p vo výpočte. Je takto možné posúdiť, ako moc je dosiahnutá hodnota ovplyvnená variabilitou s náhodnými príčinami a posunom strednej hodnoty znaku oproti cieľovej hodnote. Medzi hodnotami C_{pm} a C_p sa dá odvodiť vzťah:

$$C_{pm} = C_p \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + (\mu - T)^2}} \quad (4.15)$$

ktorý je možné upraviť na:

$$C_{pm} = \frac{C_p}{\sqrt{1 + \left(\frac{\mu - T}{\sigma}\right)^2}} \quad (4.16)$$

Zo vzťahov 4.15 a 4.16 vyplýva, že medzi hodnotami indexov C_{pm} a C_p platí nerovnosť:

$$C_{pm} \leq C_p \quad (4.17)$$

Aby boli hodnoty týchto indexov rovné, musí byť stredná hodnota μ sledovaného znaku kvality rovná cieľovej hodnote T .

4.2.4 Index spôsobilosti C_{pm}^*

Pre prípady, kedy sa nedá použiť index C_{pm} , t.j. kedy cieľová hodnota T neleží v strede tolerančného pola alebo nie je určená jedna z tolerančných medzí, bol zavedený index C_{pm}^* [2]. Tento index porovnáva vzdialenosť cieľovej hodnoty sledovaného znaku kvality od bližšej tolerančnej medze s polovicou skutočnej variability sledovaného znaku okolo tejto cieľovej hodnoty. Vypočíta sa zo vzťahu:

$$C_{pm}^* = \min \left\{ \frac{T - LSL}{3 \cdot \sqrt{\sigma^2 + (\mu - T)^2}}; \frac{USL - T}{3 \cdot \sqrt{\sigma^2 + (\mu - T)^2}} \right\} \quad (4.18)$$

Odhad indexu spôsobilosti \hat{C}_{pm}^* môže byť vypočítaný zo vzťahu:

$$\hat{C}_{pm}^* = \min \left\{ \frac{T - LSL}{3 \cdot \sqrt{(\frac{\bar{R}}{d_2})^2 + (\bar{x} - T)^2}}; \frac{USL - T}{3 \cdot \sqrt{(\frac{\bar{R}}{d_2})^2 + (\bar{x} - T)^2}} \right\} \quad (4.19)$$

Ak cieľová hodnota leží v strede tolerančných medzí, hodnota indexu C_{pm}^* bude rovná hodnote indexu C_{pm} .

4.2.5 Index spôsobilosti C_{pmk}

Posledným indexom spôsobilosti je index C_{pmk} [8]. Tento index porovnáva vzdialenosť strednej hodnoty sledovaného znaku kvality k bližšej tolerančnej medzi s polovicou variability znaku okolo cieľovej hodnoty. Je definovaný vzorcom:

$$C_{pmk} = \min \left\{ \frac{\mu - LSL}{3 \cdot \sqrt{\sigma^2 + (\mu - T)^2}}; \frac{USL - \mu}{3 \cdot \sqrt{\sigma^2 + (\mu - T)^2}} \right\} \quad (4.20)$$

Pre odhad indexu \hat{C}_{pmk} sa doporučuje použitie nasledujúceho vzťahu:

$$\hat{C}_{pmk} = \min \left\{ \frac{\bar{x} - LSL}{3 \cdot \sqrt{(\frac{\bar{R}}{d_2})^2 + (\bar{x} - T)^2}}; \frac{USL - \bar{x}}{3 \cdot \sqrt{(\frac{\bar{R}}{d_2})^2 + (\bar{x} - T)^2}} \right\} \quad (4.21)$$

Ak sú stanovené obe tolerančné medze, a tým pádom sa dajú stanoviť aj indexy C_{pm} a C_p , dá sa vzťah 4.20 upraviť na tvar:

$$C_{pmk} = \frac{C_{pk} \cdot C_{pm}}{C_p} \quad (4.22)$$

Index C_{pmk} kombinuje dobré vlastnosti oboch indexov, hlavne schopnosť zhodnotiť, či hodnoty sledovaného znaku kvality naozaj ležia v tolerančnom poli a mieru dosiahnutia stanovenej cieľovej hodnoty.

Medzi hodnotami C_{pk} a C_{pmk} sa dá odvodiť vzťah:

$$C_{pmk} = C_{pk} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + (\mu - T)^2}} \quad (4.23)$$

ktorý je možné upraviť na tvar:

$$C_{pmk} = \frac{C_{pk}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\mu - T}{\sigma}\right)^2}} \quad (4.24)$$

Zo vzťahov 4.23 a 4.24 vyplýva že medzi indexami C_{pk} a C_{pmk} platí nerovnosť:

$$C_{pmk} \leq C_{pk} \quad (4.25)$$

Zo vzťahov 4.20 a 4.22 vyplýva že medzi indexami C_{pm} a C_{pmk} platí nerovnosť:

$$C_{pmk} \leq C_{pm} \quad (4.26)$$

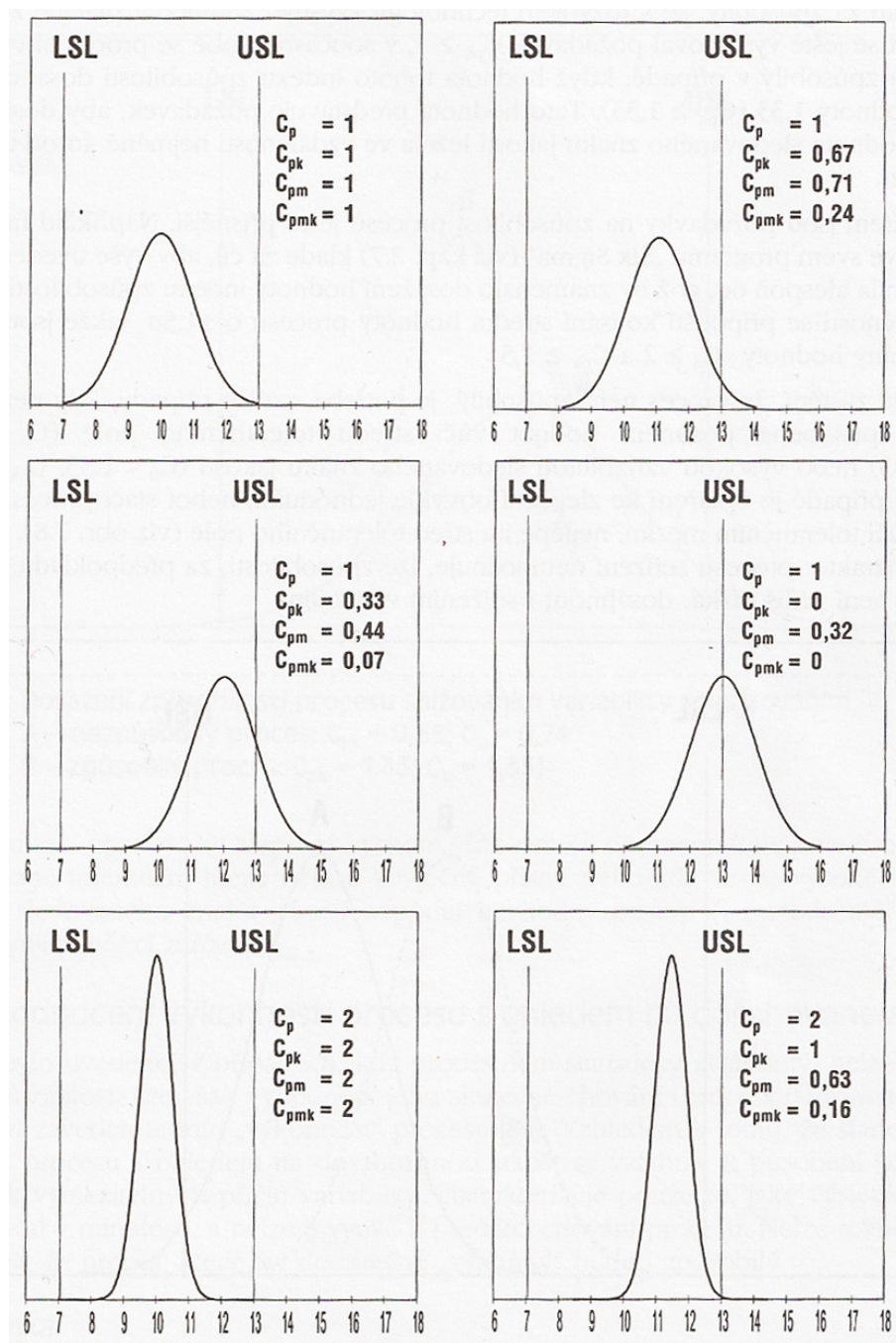
Z doposiaľ uvedených vzťahov je možné stanoviť nerovnosti medzi rôznymi indexmi následovne:

$$C_{pmk} \leq C_{pk} \leq C_p \quad (4.27)$$

$$C_{pmk} \leq C_{pm} \leq C_p \quad (4.28)$$

Rovnosť všetkých indexov je možná len v prípade, kedy sa stredná hodnota sledovaného znaku kvality rovná cieľovej hodnote, ktorá je umiestnená v strede tolerančného pola.

Každý z indexov hodnotí spôsobilosť iným spôsobom. Pre lepšie zhodnotenie spôsobilosti procesu je vhodné uvádzať viacero vhodných indexov [1] a rozdelenie sledovaného znaku voči tolerančnému polu, ktoré sú znázornené graficky. Porovnanie indexov C_p , C_{pk} , C_{pm} a C_{pmk} pre rôzne situácie rozdelenia hodnôt sledovaného znaku kvality v tolerančnom poli je na obrázku 4.1.



Obr. 4.1: Rôzne situácie rozdelenia hodnôt sledovaného znaku kvality a ich klasifikácia pomocou indexov spôsobilosti [8]

5 Praktická časť

Táto kapitola je venovaná popisu určovania spôsobilosti procesu. Začiatok kapitoly obsahuje popis cieľov a predstavenie spoločnosti v ktorej prebiehal zber dát. Následne je špecifikované meranie a navrhnutý spôsob vyhodnotenia zozbieraných dát. Najväčšia časť kapitoly je venovaná vyhodnoteniu výsledkov.

5.1 Ciele praktického experimentu

Cielom praktickej časti je najskôr zozbierať vhodnú dátovú sadu z reálneho výrobného procesu a následne zhodnotiť jeho spôsobilosť. Dáta budú zozbierané v dlhšom časovom úseku, aby bola vytvorená reprezentatívna vzorka pre aplikáciu regulačných postupov. Následne bude zozbieraná dátová sada spracovaná do vhodnej formy pre použitie v programe Minitab, pomocou ktorého budú zostavené regulačné diagramy a zhodnotená spôsobilosť procesu.

5.1.1 Predstavenie spoločnosti

Spoločnosť XYZ je nadnárodná spoločnosť, ktorá pôsobí vo viac ako 130 krajinách, má viac ako 100 výrobných závodov a zamestnáva viac ako 75 000 ľudí po celom svete. Zaoberá sa návrhom a výrobou produktov konektivity a senzorov pre rôzne priemyselné odvetvia ako sú automobilový priemysel, letectvo, obrana, priemyselné zariadenia, zdravotníctvo, spotrebná elektronika a energie. Hlavným portfóliom, na ktoré sa spoločnosť zameriava sú konektory a senzory, ktoré sa delia na 3 časti: komunikačné (elektrické komponenty pre chladničky, umývačky, sušičky, klimatizácie, mikrovlnné rúry a kuchynské spotrebiče), dopravné (komponenty pre automobilový priemysel ako sú podvozkové systémy, motorové a hnacie ústrojenstvo, bezpečnostné systémy, nabíjanie a batérie) a priemyselné (rôzne komponenty a senzory pre priemyselnú komunikáciu a distribúciu energie, osvetlenie, letectvo, zdravotníctvo...). Praktická časť tejto práce bola vykonaná vo výrobnom závode, ktorý sa predovšetkým zaoberá výrobou komponentov pre automobilový priemysel. Tento závod pozostáva z viacerých oddelení zameraných na rôzne časti výrobného procesu. Táto práca analyzuje spôsobilosť procesu na oddelení, ktoré sa zaoberá výrobou konektorov pre elektromobily.

5.1.2 Špecifikácia merania

Meranie prebiehalo počas päťdesiatich dní. Na každej smene sa meria zvolený parameter vždy na začiatku, uprostred a pred koncom smeny. Odobraná vzorka je vždy

päť po sebe nasledujúcich kusov a počas jednej smeny meranie vykonáva zaškolená nezainteresovaná osoba, ktorá sa priamo nepodieľa na výrobnom procese. Meranie prebieha pomocou digitálneho mikrometru Mitutoyo.

5.1.3 Spôsob vyhodnotenia

Namerané dáta budú vyhodnotené pomocou programu Minitab a s využitím MS Excel. Minitab je štatistický software obsahujúci balík štatistických metód určených na analýzu dát. Je určený pre použitie ako na vysokých školách tak aj pre odborníkov v praxi. Bol vyvinutý na Pensylvánskej štátnej univerzite ako podpora pre výuku štatistiky. Dnes je používaný pre implementácie Six Sigma a iných štatistických metód pre zlepšovanie procesu.

5.2 Vyhodnotenie procesu

V tejto podkapitole budú na namerané dáta z reálneho procesu aplikované postupy pre určenie spôsobilosti procesu, ktoré boli popísané v teoretickej časti tejto práce. Namerané dáta sa nachádzajú v prílohe.

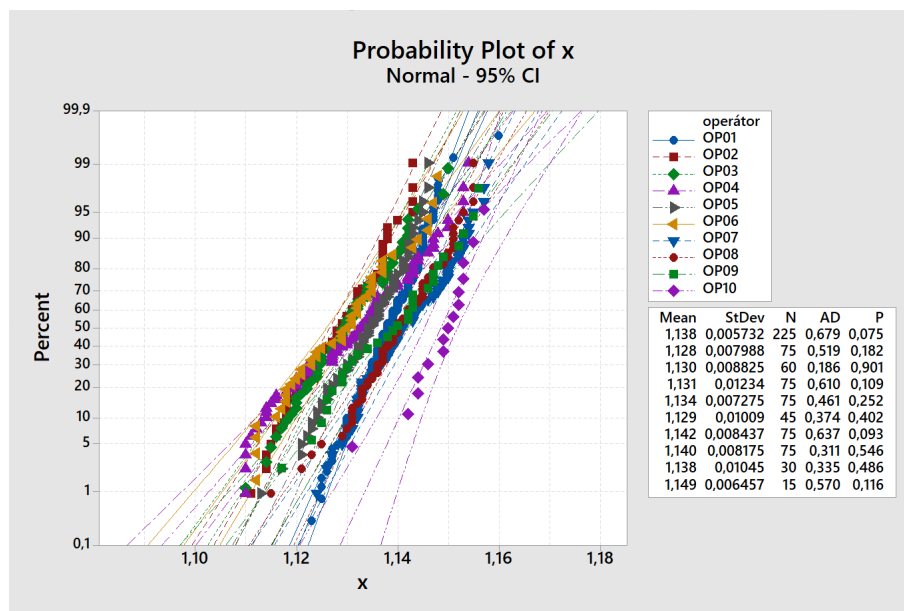
5.2.1 Zber datovej sady

Zber dát prebiehal pomocou formulárov, ktorých príklad je uvedený v prílohe B. Zber prebiehal počas 50tich dní, kedy bol daný stroj v prevádzke. Počas týchto 50tich dní sa striedali 4 smeny. Stroj bol v prevádzke nepravidelne. Na meraní dát sa striedalo 10 operátorov, ktorý daný výrobok nevyrábali, ale sú školení na zber dát pre kontrolu kvality. Kvôli nepravidelnej prevádzke stroja nebolo možné zaistiť, aby meranie vykonával vždy rovnaký operátor na smene. Zber dát prebiehal tak, že na začiatku každej smeny, kedy bol daný stroj v prevádzke, tento operátor odobral 5 po sebe nasledujúcich vzorkov na meranie. Tento postup zopakoval aj počas smeny a pred koncom. Počas obdobia zberu dát bolo použitých 15 rôznych šarží, ktoré môžu potencionálne mať rôzne vlastnosti (tieto komponenty dodáva externý subdodávateľ a nie je možné priamo ovplyvniť výrobný proces vstupných komponentov).

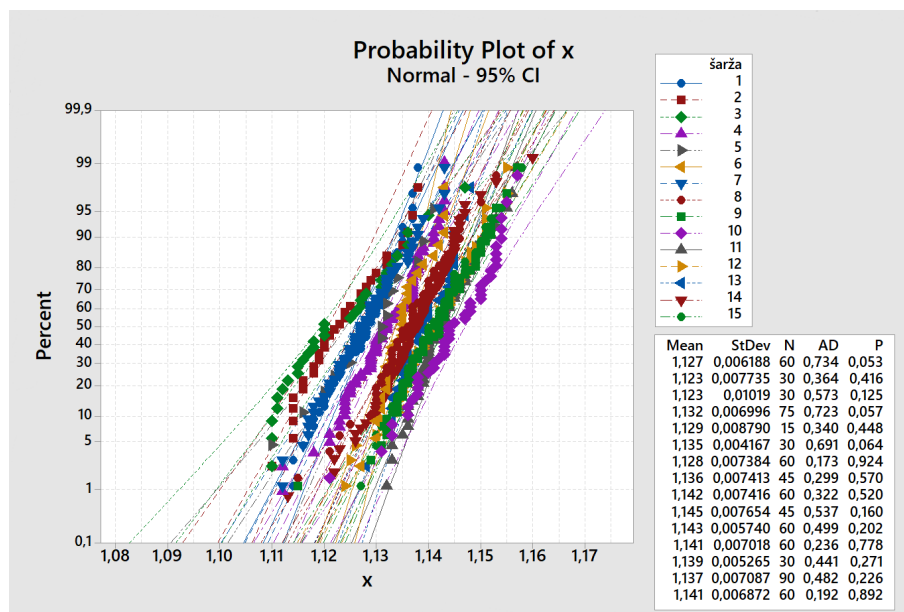
5.2.2 Analýza dát

Táto časť práce bude spracovaná pomocou programu Minitab. Prvým krokom analýzy spôsobilosti je overenie základného predpokladu, že dáta majú normálne rozdelenie. Normalita dát bude overená pomocou testovania hypotézy, ktorá bude testovaná na hladine významnosti $\alpha = 0,05$. Namerané dáta boli vytriedené pomocou dvoch filtrov – ako prvé boli dáta vytriedené pomocou operátora, ktorý dané hodnoty

meral a v druhom prípade boli dáta vyfiltrované podľa šarže vstupného materiálu. Na obrázkoch 5.1 a 5.2 je možné vidieť, že hodnota $p > \alpha$, čo znamená, že sa nezamieta hypotéza o výbere z normálneho rozdelenia a dáta sa dajú považovať za normálne rozdelené.



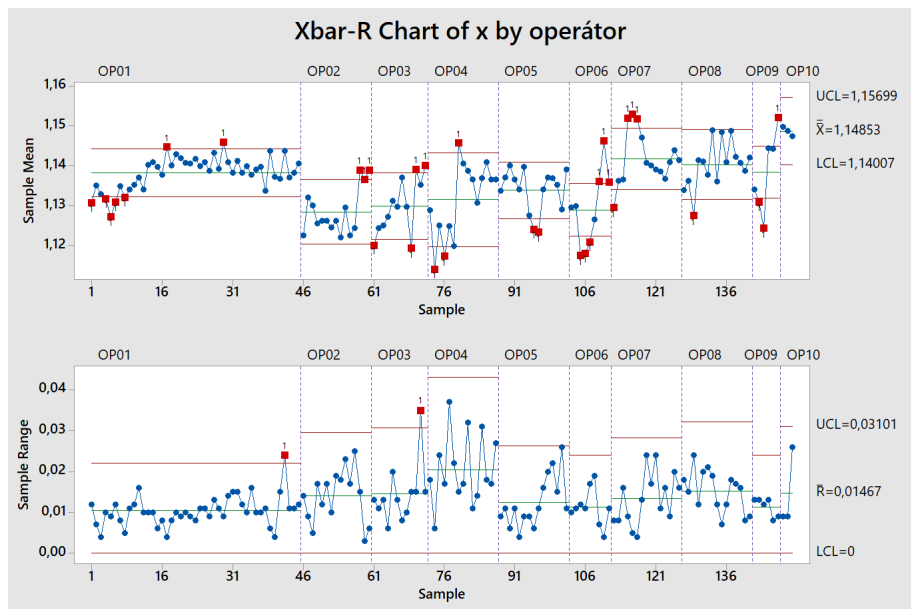
Obr. 5.1: Pravdepodobnostný diagram pre dáta vyfiltrované podľa operátora



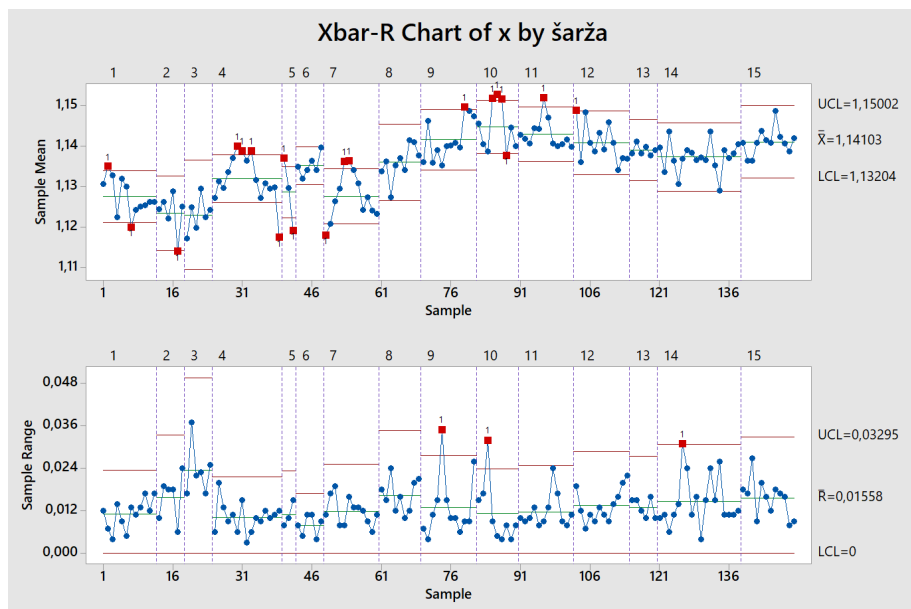
Obr. 5.2: Pravdepodobnostný diagram pre dáta vyfiltrované podľa šarže

Ak majú dáta normálne rozdelenie, je možné zostrojiť regulačný diagram. Z dôvodu, že podskupiny majú výber o veľkosti $n = 5$, bol zvolený regulačný diagram \bar{x}, R .

Na nasledujúcich obrázkoch 5.3 a 5.4 je zobrazený diagram \bar{x}, R .

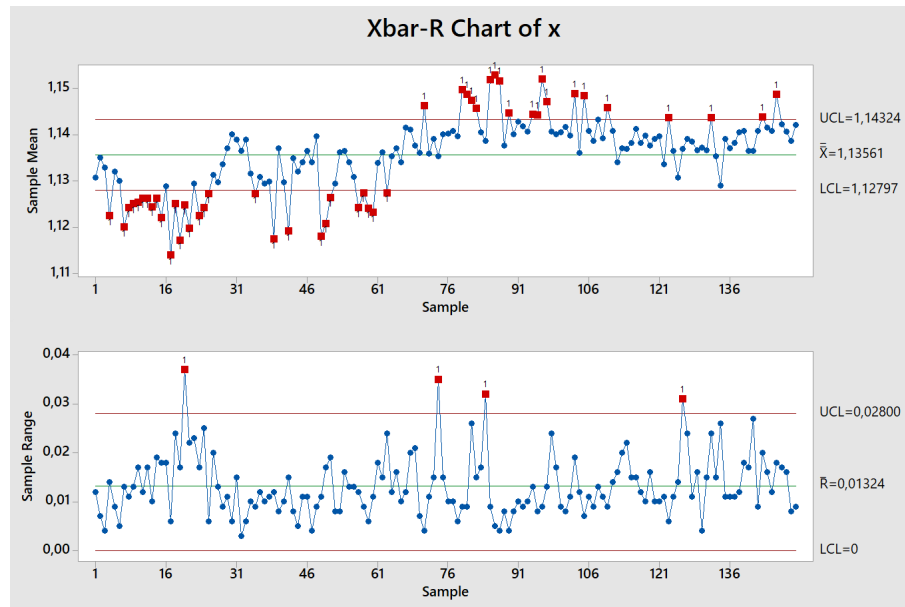


Obr. 5.3: Diagram xbar-R filtrovaný podľa operátora

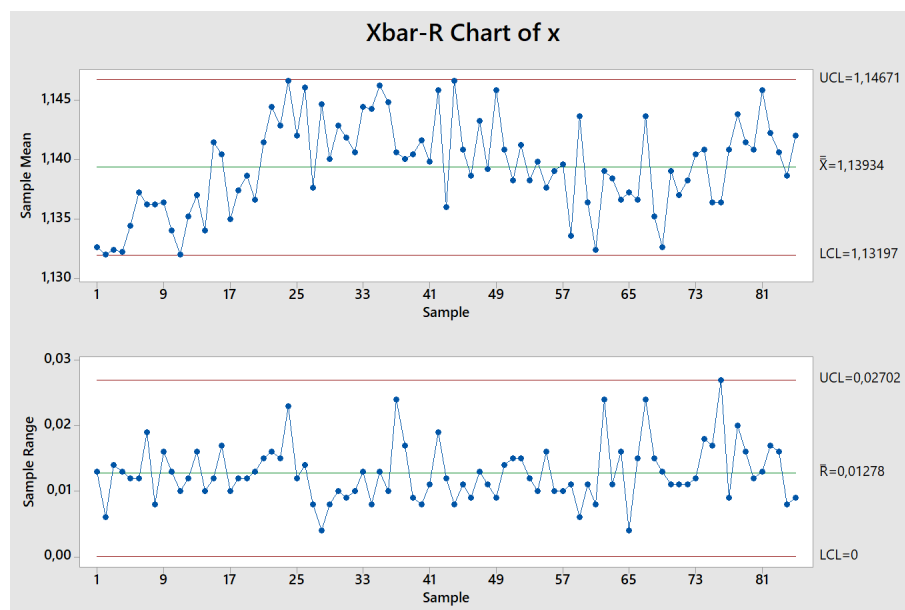


Obr. 5.4: Diagram xbar-R filtrovaný podľa šarže

Na obrázku 5.3 je diagram roztriedený podľa jednotlivých operátorov, a na obrázku 5.4 podľa čísla šarže. Z obrázkov je viditeľné, že každá šarža má pravdepodobne mierne rozdielne vlastnosti, keďže jej hodnoty sa s rôznym označením šarže menia. Takisto aj pre každého operátora vyzerá graf a jeho výsledné regulačné priamky inak. Keďže na takomto grafe by sa robila analýza komplikovane, skúsila som dať všetky namerané hodnoty do jedného grafu, ktorý je na obrázku 5.5.

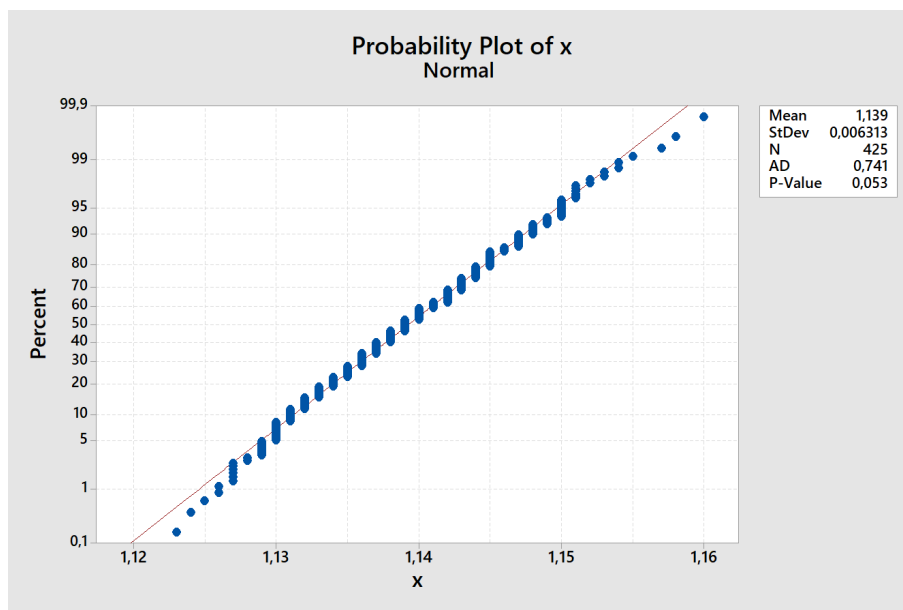


Obr. 5.5: Diagram xbar-R pre celý výber



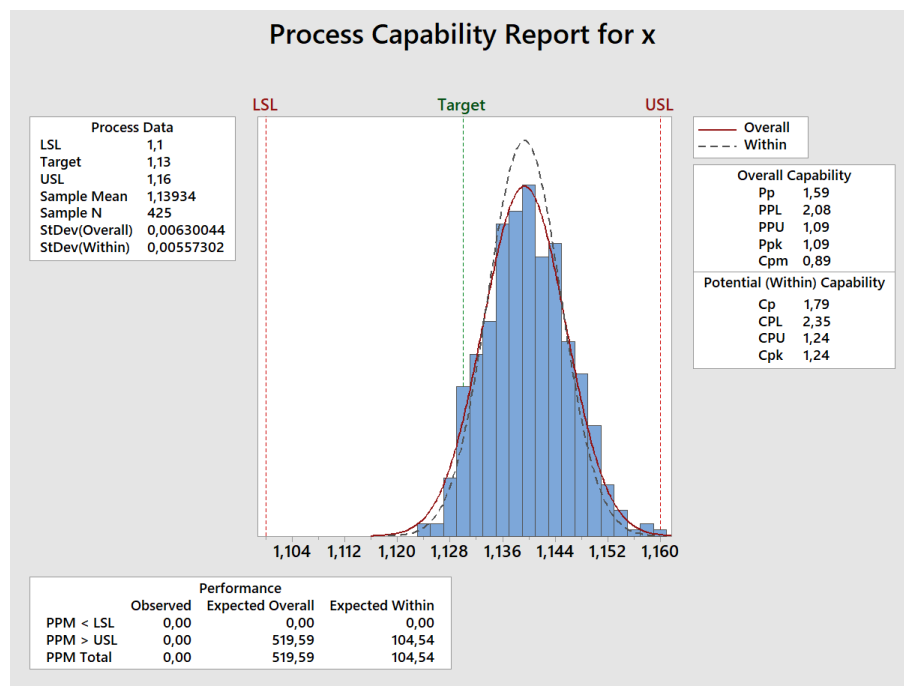
Obr. 5.6: Diagram xbar-R po odstránení niektorých bodov

Na grafe pre priemernú hodnotu (obrázok 5.5, vrchný graf) je vidieť, že veľa bodov sa nachádza mimo regulačné medze – na obrázku 5.5 zvýraznené červené body. Toto by mohlo byť spôsobené tým, že každý operátor meria hodnoty iným spôsobom. Aby mohli byť dané hodnoty z grafu odstránené, je potrebné najprv z procesu odstrániť príčiny, ktoré ovplyvňujú tieto hodnoty. Najviac dané dáta ovplyvňuje oprava stroja a nový, čerstvo zaškolený pracovníci. Po odstránení ich vplyvov dostaneme graf, ktorý nemá žiaden bod mimo regulačné medze, ako je možné vidieť na obrázku 5.6.



Obr. 5.7: Pravdepodobnostný diagram pre upravené hodnoty

Keďže proces je už v štatisticky zvládnutom stave, je možné prejsť k hodnoteniu spôsobilosti. Najprv je však potrebné overiť normalitu dát. Na obrázku 5.7 je vidieť, že dáta majú aj po odstránení niektorých bodov normálne rozdelenie, pretože p-hodnota vyšla väčšia ako α . Na ďalšom obrázku 5.8 je vyhodnotenie spôsobilosti tohto procesu. Z grafu je viditeľné, že dáta síce majú normálne rozdelenie, ale proces nie je vycentrovaný a jeho stredná hodnota je posunutá k vyššej tolerančnej medzi. Hodnota indexu C_p vyšla 1,79, z čoho by vyplývalo že proces je spôsobilý a dosahovaná presnosť je väčšia než predpísaná. Tento index ale hodnotí iba to, či hodnota sledovaného znaku leží medzi tolerančnými medzami USL a LSL . Taktiež tento index predpokladá, že sa stredná hodnota sledovaného znaku nachádza v strede tolerančného pola. Tým pádom že proces nie je vycentrovaný, nemôžem hodnotiť proces iba pomocou tohoto indexu. Druhým indexom je index C_{pk} , ktorý v tomto prípade vyšiel 1,24, čo je menej ako požadovaná hodnota. Proces preto hodnotím ako nespôsobilý.



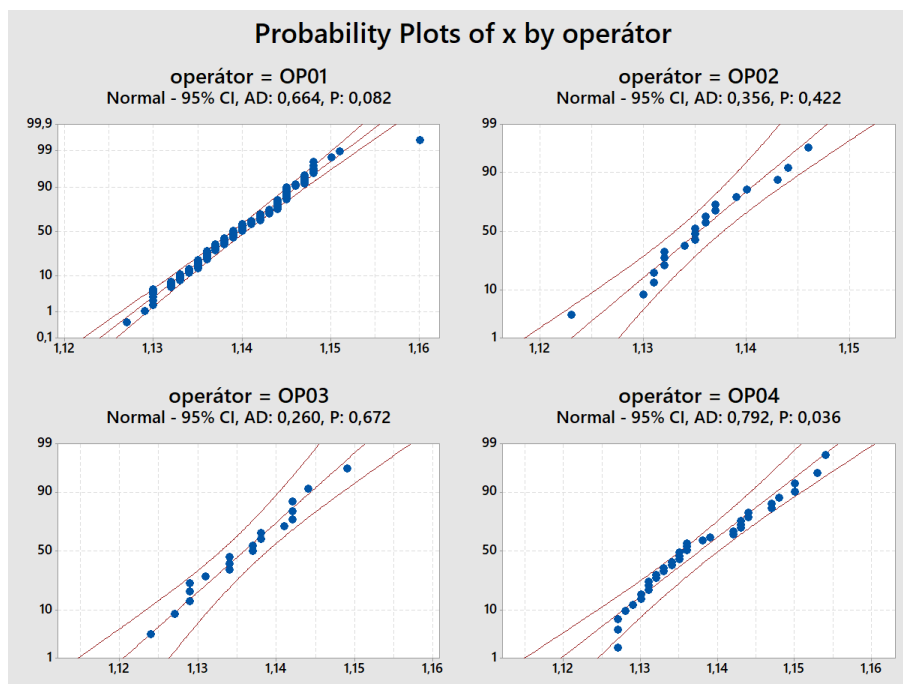
Obr. 5.8: Hodnotenie spôsobilosti procesu

Ďalším spôsobom ako sa dá na dáta pozeráť, je rozdeliť upravené dáta podľa operátorov a zhodnotiť spôsobilosť každého operátora zvlášť. Ako prvé je vhodné skontrolovať, či sa nezmenilo rozdelenie po vymazaní niektorých hodnôt. Na obrázku 5.9 a 5.10 je viditeľné, že si jednotlivé dáta zachovali normálne rozdelenie, čo znázorňuje hodnota p pri jednotlivých grafoch, ktorá je väčšia ako α . Jedine v prípade operátora číslo 4 vyšla hodnota $p = 0,036$, čo je menej ako $\alpha = 0,05$. Opakovala som 10 testov s pravdepodobnosťou zlyhania 5%, a p hodnota vyšla iba raz menšia ako 0,05, tak po konzultácii predpokladám, že aj toto rozdelenie bude normálne.

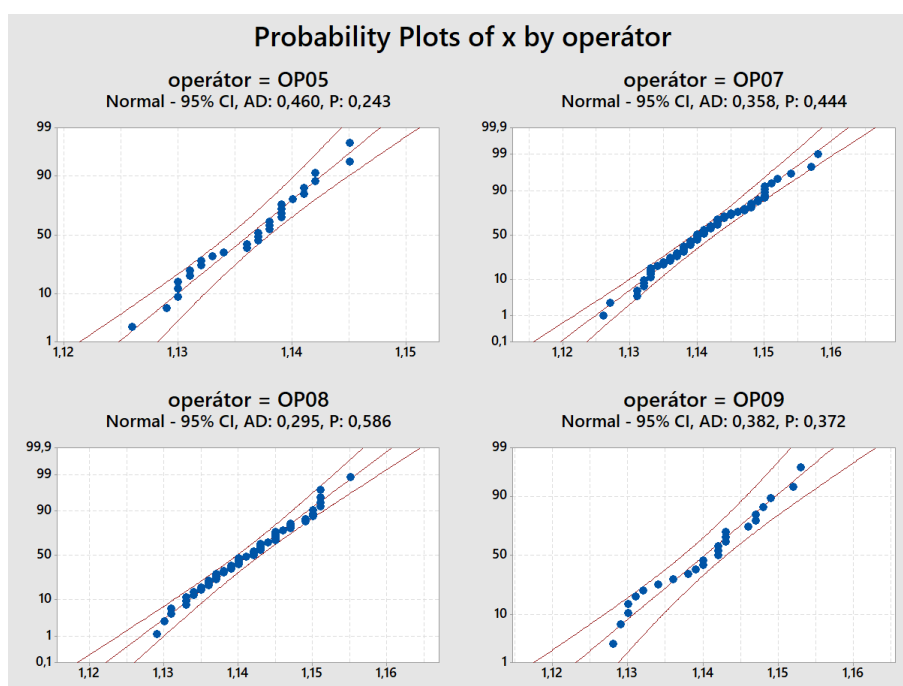
Na grafoch, ktoré sú zobrazené na obrázkoch 5.11 a 5.12 môžeme vidieť jednotlivé spôsobilosti procesu pre každého operátora zvlášť. Je zjavné, že operátori s číslom 4, 7 a 8 nedosahujú pri indexe C_{pk} ani hodnotu 1. Hodnota indexu C_p u operátora s číslom 4 je dokonca menšia ako 1,33, z čoho vyplýva, že tento operátor taktiež nemá dostatok skúsenosti a bude potrebné ho znovu dôsledne preškoliť. Všetci títo operátori 4, 7 a 8 sú z tejto vybranej vzorky vo firme najkratšiu dobu. Najlepšie výsledky vychádzajú u operátora s číslom 5, ktorý dosahuje najvyššiu hodnotu indexu C_p a C_{pk} . Podobné výsledky dosahujú aj operátori číslo 2 a 3, ktorý sú vo firme najdlhšie.

Na obrázku 5.13 je zobrazený diagram \bar{x}, R s ostatnými testami vymedziteľných príčin. Mnoho príčin je daných dlhodobým pôsobením, ktoré nebolo možné odhaliť, takže som sa nimi nezaoberala.

Ďalšie dáta, ktoré boli z danej spoločnosti získané, sú informácie o neplánovaných

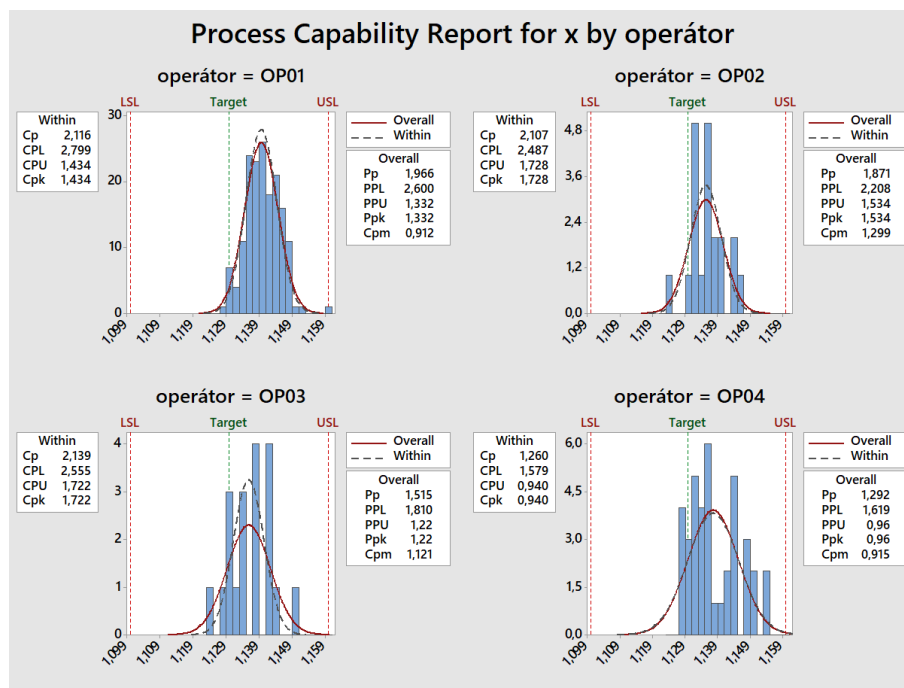


Obr. 5.9: Pravdepodobnostný diagram podľa jednotlivých operátorov - 1.časť

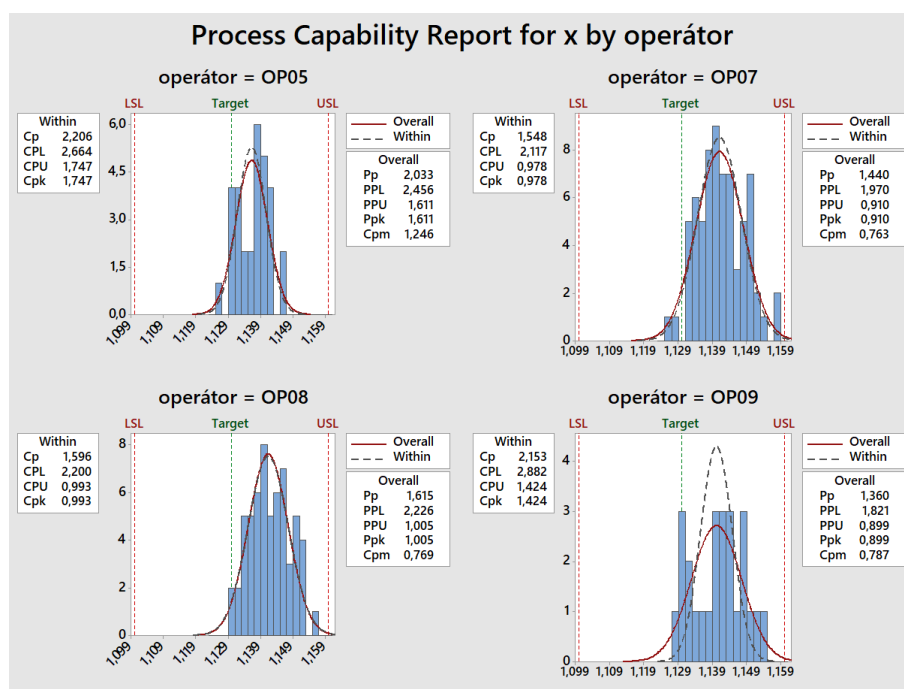


Obr. 5.10: Pravdepodobnostný diagram podľa jednotlivých operátorov - 2.časť

zastaveniach a opravách stroja. Jedná sa o hodnoty, ktoré nemajú normálne rozdelenie, a z toho dôvodu bol ako regulačný diagram zvolený diagram pre počet nezhôd (c). Tento graf na obrázku 5.14 zobrazuje počet neplánovaných zastavení stroja za smenu. Z grafu je zrejmé, že sa stroj občas za smenu nezastaví vôbec a niekedy viac

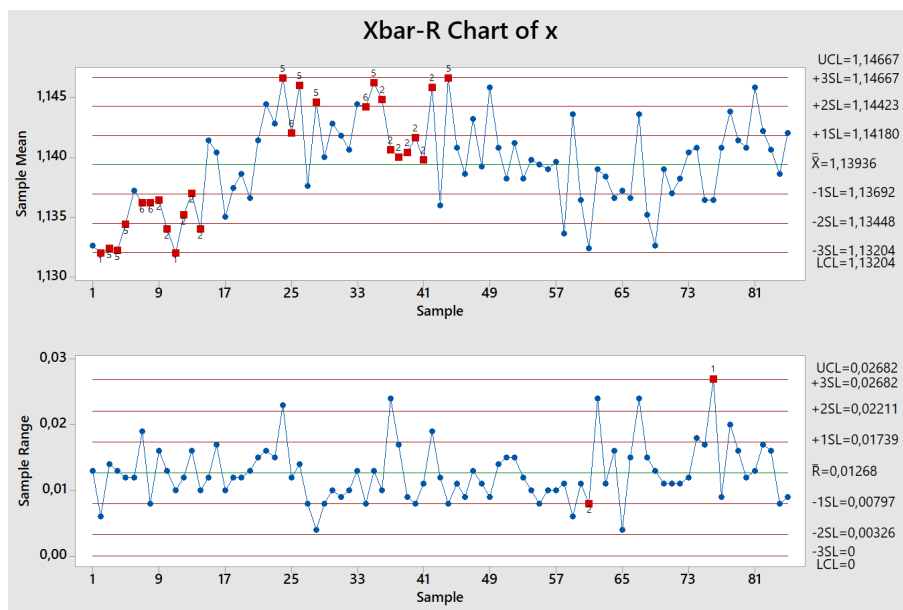


Obr. 5.11: Hodnotenie spôsobilosti procesu podľa jednotlivých operátorov - 1.časť

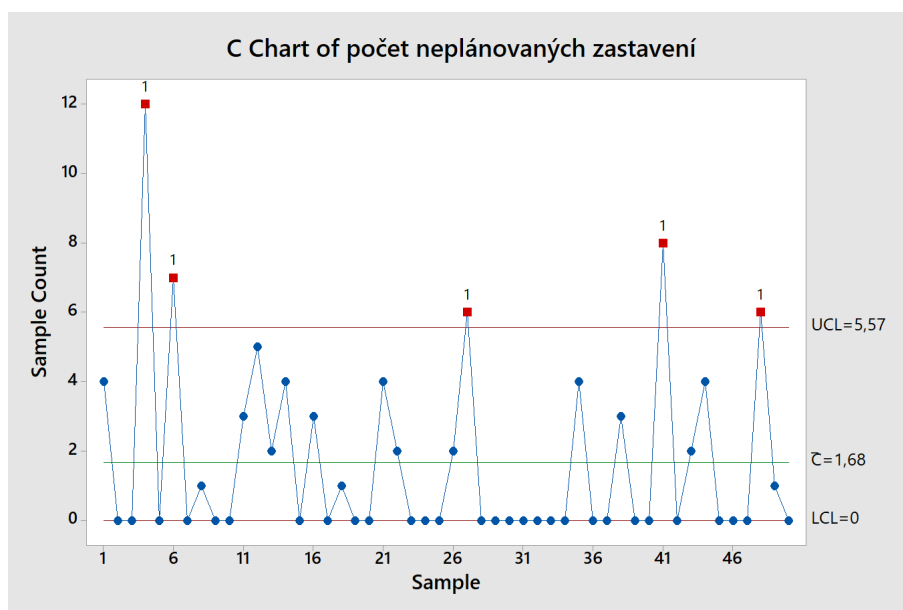


Obr. 5.12: Hodnotenie spôsobilosti procesu podľa jednotlivých operátorov - 2.časť

krát, vtedy je potrebný zásah mechanika, ktorý stroj odstaví a opraví. Zastavenie sa deje príliš často, z tohoto dôvodu bola navrhnutá preventívna údržba, ktorá by mohla pomôcť aj zmenšeniu rozptylu hodnôt sledovaného znaku kvality a tým by sa minimalizovala pravdepodobnosť chybné vyrobeného kusu.



Obr. 5.13: Diagram xbar-R so všetkými testami vymedziteľných príčin



Obr. 5.14: Diagram C pre počet neplánovaných zastavení stroju

5.3 Vyhodnotenie dosiahnutých výsledkov

Dlhodobou variabilitou (P_p , P_{pk}) sa nie je možné zaoberať, z dôvodu že je proces nestabilný a pravdepodobne naň pôsobia vymedziteľné príčiny, ktoré sa nepodarilo odhaliť. Dáta sa zbierali na diaľku, tým pádom nebolo možné do procesu zasiahnuť a nebolo možné odhaliť vymedziteľné príčiny. Z tohoto dôvodu sa práca zameriava na krátkodobú spôsobilosť, ktorá bola hodnotená pomocou indexov C_p a C_{pk} .

Index spôsobilosti C_{pk} z dôvodu asymetrie vyšiel 1,24, čo je menej ako požadovaný štandard 1,33. Z tohoto dôvodu hodnotím proces, čo sa týka krátkodobej spoľahlivosti, ako nespôsobilý. Vzhľadom k tomu, že index C_p vyšiel 1,79, má proces predpoklad byť spôsobilým, ale len v prípade, že sa vycentruje. Taktiež má proces veľký potenciál byť spôsobilým, keby sa vyriešili vymedziteľné príčiny, ktoré určite zmenšia variabilitu procesu. Ak by sa proces podarilo vycentrovať, hodnota C_p by sa mohla rovnať hodnote C_{pk} a proces by bol spôsobilý. Okrem zamerania sa na odhaľenie príčin spôsobilosti, by bolo vhodné zamerať sa aj na analýzu systému merania, pretože na grafe 5.3 je viditeľné, že medzi rôznymi operátormi sú veľké rozdiely čo sa týka nameraných hodnôt. Kvôli hodnoteniu spôsobilosti tohoto procesu som z dát vyradila operátora číslo 6 a číslo 10, ktorí sú síce zaškolení, ale sú vo firme noví, takže nemajú ešte dostatok skúseností s meraním.

6 Záver

Cielom tejto záverečnej práce bolo určiť spôsobilosť vybraného reálneho technologického procesu. Obsahom kapitoly 2 je úvod do štatistickej regulácie procesov, kde sa nachádza popis variability a jej náhodných a vymedziteľných príčin, ktoré ju spôsobujú. Ďalej sú v tejto kapitole popísané pojmy a parametre súvisiace s regulačnými diagramami. Samotné regulačné diagramy sú obsahom kapitoly 3, kde sú popísané najčastejšie používané Shewhartove regulačné diagramy, ale aj menej známe, ako napríklad diagram EWMA alebo CUSUM. V kapitole 4 sú uvedené indexy pre normálne rozdelenie, vrátane menej používaných indexov spôsobilosti, ako je napríklad Taguchiho index spôsobilosti. V praktickej časti som spracovala dáta, ktoré boli zozbierané v reálnej spoločnosti. Tieto dáta mi bolo povolené publikovať, ale iba v prípade, že spoločnosť a aj konkrétny proces budú utajené a z tohoto dôvodu bola firma popísaná iba obecné. Zozbierané dáta boli na začiatku nestabilné, ich hlavným problémom bol problém s dlhodobou variabilitou a problém s vymedziteľnými príčinami. Komplikáciou pri zbere dát bola situácia s pandémiou vírusu COVID-19, pretože nebolo možné sa zúčastniť na ich zbere. Zozbierané dáta mi boli zasielané a tým pádom nebolo možné kontrolovať správne meranie. V prípade mojej prítomnosti by bolo potencionálne možné nejakú vymedziteľnú príčinu odhaliť. Dáta boli napriek tomu vyhodnotené, pričom boli použité postupy pre krátkodobú variabilitu a indexy C_p a C_{pk} . Okrem samotného procesu sa do budúcnosti bude potrebné zaoberať aj analýzou systému merania, k čomu prispelo zistenie, že výsledky sa líšia operátor od operátora. Tento postup bol detailne popísaný v kapitole 5. Zozbierané dáta boli vyhodnotené v programe Minitab, kde sa po prvotnej analýze ukázalo, že proces bol nestabilný a tým pádom boli aplikované postupy pre krátkodobú spôsobilosť procesu.

Čo sa týka krátkodobej spôsobilosti, hodnotenie spôsobilosti určilo výsledný proces ako nespôsobilý. Je možné aby sa proces stal spôsobilým, ale bude potrebné dostať priemernú hodnotu do stredu regulačných medzí ("vycentrovať ho"). Bude tiež potrebné vyriešiť vymedziteľné príčiny, ktoré určite zmenšia variabilitu. Ďalším krokom bude preškolenie operátorov a hlavne analýza systému merania. Tým sa zmenší aj variabilita, ktorá prispeje k zlepšeniu C_p a C_{pk} . Tieto problémy sa v posledných mesiacoch riešili distančne z dôvodu problémov spôsobených pandémiou vírusu COVID-19, takže zásahy do procesu boli obmedzené.

Literatúra

- [1] TOŠENOVSKÝ, Josef. *Statistické metody pro zlepšování jakosti*. Ostrava: Montanex, 2000. ISBN 80-722-5040-X.
- [2] NENADÁL, Jaroslav. *Moderní systémy řízení jakosti: quality management*. 2. dopl. vyd. Praha: Management Press, 2002. ISBN 80-726-1071-6.
- [3] MONTGOMERY, Douglas. *Introduction to statistical quality control*. 5th ed. Hoboken: John Wiley, 2005. ISBN 978-471-66122-8
- [4] JAROŠOVÁ, Eva a Darja NOSKIEVIČOVÁ. *Pokročilejší metody statistické regulace procesu*. Praha: Grada Publishing, 2015. Expert (Grada). ISBN 978-80-247-5355-3.
- [5] BALATKA, Sláva a Olga KUTNOHORSKÁ. *Inženýrská statistika pro ekonomy*. 2., přeprac. a rozš. vyd. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2014. ISBN 978-80-7080-894-8.
- [6] *Statistická regulace procesů (SPC): příručka*. 2. vyd. Praha: Česká společnost pro jakost, 2006. ISBN 80-020-1810-9.
- [7] ČSN ISO 8258 (010271). *Shewhartovy regulační diagramy*. Praha: Český normalizační institut, 05/2016.
- [8] PLURA, Jiří. *Plánování a neustálé zlepšování jakosti*. Praha: Computer Press, 2001. Business books (Computer Press). ISBN 80-722-6543-1..
- [9] BENKOVÁ, Marta. *Zabezpečovanie kvality procesov* [online]. Košice, 2007 [cit.2020-05-28]. Dostupné z: <http://people.tuke.sk/peter.bober/srp/doc/>
- [10] Mendelova univerzita v Brně. *Management kvality pro všeobecné zemědělství - Regulační diagramy*. Brno [cit.2020-06-26]. Dostupné z: http://web2.mendelu.cz/af_291_projekty2/vseo/print.php?page=4838&typ=html
- [11] Minitab, LLC. *Overview for CUSUM chart* [cit.2020-06-26]. Dostupné z: <https://support.minitab.com/en-us/minitab/18/help-and-how-to/quality-and-process-improvement/control-charts/how-to/time-weighted-charts/cusum-chart/before-you-start/overview/>
- [12] KUMAR, Dharendra. *Six sigma best practices : a guide to business process excellence for diverse industries*. Ft. Lauderdale, Fla: J. Ross Pub, 2006. Print.

- [13] Minitab, LLC. *Overview for Zone Chart* [cit.2020-06-26]. Dostupné z: <https://support.minitab.com/en-us/minitab/18/help-and-how-to/quality-and-process-improvement/control-charts/how-to/variables-charts-for-subgroups/zone-chart/before-you-start/overview/>
- [14] Minitab, LLC. *Example of EWMA Chart* [cit.2020-06-26]. Dostupné z: <https://support.minitab.com/en-us/minitab/18/help-and-how-to/quality-and-process-improvement/control-charts/how-to/time-weighted-charts/ewma-chart/before-you-start/example/>
- [15] KnowWare International Inc. *Hotelling T2 Chart in Excel* [cit.2020-06-26]. Dostupné z: <https://www.qimacros.com/control-chart/hotelling-t2-chart/>
- [16] JAROŠOVÁ, Eva (2015). *Regulační diagramy EWMA* [cit.2020-06-26]. Dostupné z: https://www.csq.cz/fileadmin/user_upload/Spolkova_cinnost/Odborne_skupiny/Statisticke_metody/sborniky/196_82_EWMA.pdf.
- [17] KROPÁČ, Jiří. *Statistika C: statistická regulace, indexy způsobilosti, řízení zásob, statistické přejímky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta podnikatelská, 2008. ISBN 978-80-214-3591-9.

Zoznam príloh

A Konštanty	63
B Namerané dáta	65

A Konštanty

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	2,121	1,732	1,5	1,342	1,225	1,134	1,061	1	0,949
A2	1,88	1,023	0,729	0,577	0,483	0,419	0,373	0,337	0,308
A3	2,659	1,954	1,628	1,427	1,287	1,182	1,099	1,032	0,975
B3	0	0	0	0	0,03	0,118	0,185	0,239	0,284
B4	3,267	2,568	2,266	2,089	1,97	1,882	1,815	1,761	1,716
B5	0	0	0	0	0,029	0,113	0,179	0,232	0,276
B6	2,606	2,276	2,088	1,964	1,874	1,806	1,751	1,707	1,669
D1	0	0	0	0	0	0,204	0,388	0,547	0,687
D2	3,686	4,358	4,698	4,918	5,078	5,204	5,306	5,393	5,469
D3	0	0	0	0	0	0,076	0,136	0,184	0,223
D4	3,267	2,574	2,282	2,114	2,004	1,924	1,864	1,816	1,777
C4	0,7979	0,8862	0,9213	0,94	0,9515	0,9594	0,965	0,9693	0,9727
d2	1,128	1,693	2,059	2,326	2,534	2,704	2,847	2,97	3,078

Tab. A.1: Výber koeficientov pre prepočet regulačných medzí regulačných diagramov (ostatné sa nachádzajú v norme ČSN ISO 8258).

B Namerané dáta

Príklad formuláru pre zber dát. OP. označuje číslo operátora a Č.M. číslo merania.

DEN	1	DEN	2	DEN	3
OP.	ŠARŽA	OP.	ŠARŽA	OP.	ŠARŽA
OP01	Šarža01	OP02	Šarža01	OP03	Šarža01
Č.M.	HODNOTA	Č.M.	HODNOTA	Č.M.	HODNOTA
1	1,137	16	1,124	31	1,114
2	1,132	17	1,124	32	1,111
3	1,125	18	1,114	33	1,120
4	1,132	19	1,122	34	1,113
5	1,127	20	1,122	35	1,113
6	1,134	21	1,137	36	1,113
7	1,126	22	1,138	37	1,118
8	1,131	23	1,135	38	1,124
9	1,128	24	1,143	39	1,118
10	1,131	25	1,140	40	1,118
11	1,131	26	1,132	41	1,117
12	1,132	27	1,127	42	1,118
13	1,133	28	1,132	43	1,117
14	1,131	29	1,129	44	1,117
15	1,133	30	1,130	45	1,117

Tab. B.1: Formulár pre zber dát – príklad č.1

DEN	4	DEN	5	DEN	6
OP	ŠARŽA	OP	ŠARŽA	OP	ŠARŽA
OP02	Šarža01	OP02	Šarža2	OP04	Šarža2
Č.M.	HODNOTA	Č.M.	HODNOTA	Č.M.	HODNOTA
46	1,132	61	1,112	76	1,127
47	1,120	62	1,118	77	1,118
48	1,126	63	1,120	78	1,136
49	1,116	64	1,120	79	1,135
50	1,133	65	1,120	80	1,128
51	1,132	66	1,123	81	1,110
52	1,130	67	1,124	82	1,116
53	1,121	68	1,118	83	1,116
54	1,128	69	1,111	84	1,114
55	1,120	70	1,118	85	1,114
56	1,135	71	1,119	86	1,122
57	1,132	72	1,121	87	1,114
58	1,123	73	1,121	88	1,116
59	1,118	74	1,114	89	1,117
60	1,123	75	1,124	90	1,119

Tab. B.2: Formulár pre zber dát – príklad č.2